

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  
(Influence of internal erosion around buried pipes due to internal  
water pressure on the risk of ground depression)

小橋朋弥<sup>1</sup>, 前田健一<sup>2</sup>, 林英璃奈<sup>3</sup>

1 名古屋工業大学大学院・工学専攻社会工学系プログラム・E-mail address 35415046@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

## 概 要

都市部を中心とする全国各地で陥没災害が多発しており、埋設管の劣化に起因する土砂の流出が主な原因である。近年では集中豪雨の増加により、管内に流入する水の量が増加している。管内が満管になることで欠損部分から水が流出し、これを内水圧と呼ぶ。内水圧が陥没発生を助長することは判明しているも、具体的なメカニズムについては解明されていない。よって、本稿ではそれらを解明するために模型実験及び数値解析を行った。その結果、内水圧は陥没発生の原因である緩み、粗粒化の発生を助長することが明らかになった。内水圧作用後の欠損上の土を押し流そうと下向きに作用する流速と、土の有効応力から算出される過剰間隙水圧比が一定条件を満たすことで粗粒化が発生することが判明した。また、地下水位が低いと欠損付近の浸透流の大きさが小さくなる為、内水圧による粗粒化が発生しやすい。粗粒化の発生により流速が増大し、陥没発生リスクを増大させる。

キーワード：陥没，内水圧，粗粒化，内部侵食，管渠

## 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土砂の流出である。陥没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。そのため、予防保全への転換が求められている。そこで、蓄積された実験データより効率的で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、(4)地表面沈下の現象に大別され、構造力学、砂防工学等の知見を活かし複合的に事象を捉える必要がある。これを基にして陥没危険度の評価を行い、危険度を分岐する指標の提案と根拠となる現象について示した。

しかし、このフローには外力が考慮されていない。既往研究<sup>1)</sup>では管渠に溜まる水（内水）陥没発生の要因の一つであることが判明した。これは、管が満管になるほどの内水発生時に管の破損部から水が噴出し、周辺地盤から土を流出させるためであり、下水道が合流式の場合においては発生リスクが高くなる。近年、集中豪雨の増加に伴い内水発生<sup>2)</sup>の増加も考えられるが、内水による陥没発生の具体的なメカニズムは解明されておらず対策が

急務である。

本稿の流れを以下に示す。第 2 章では、空洞形成過程における危険度評価フローを示す。2.2 節では構造力学の視点を用いて欠損部が閉塞するための閾値を求める。2.3 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。2.4 節では地盤工学の視点から内部侵食の有無についての指標を示す。2.5、2.6 節ではトンネル工学の視点から空洞の範囲予測を示す。第 3 章では、内水による陥没進展への影響を模型実験及び数値解析を用いて検討する。第 4 章では、第 2~3 章で得られた知見からまとめを行う。

## 2. 空洞形成過程における危険度評価フロー

### 2.1 実験土槽及び実験条件

図-1 に実験土槽の概略図、表-1 に各土槽の寸法、図-2 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、欠損が生じた管渠周辺地盤を再現した。土槽は 3 種類であり、水位、試料、欠損等の条件を変化させ実験を行った。なお、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。

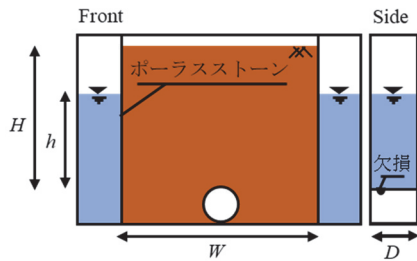
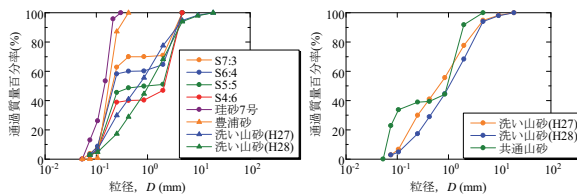


図-1 実験土槽の概略図

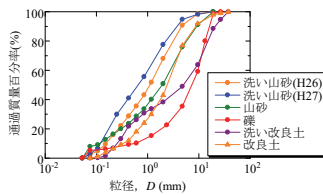
表-1 実験土槽の寸法及び実験条件

土槽名	小型土槽	中型土槽	大型土槽
H(mm)	500	800	800
W(mm)	500	1200	1600
D(mm)	250	250	500
水位 h(mm)	100,200,300,400,500	500	325,525,735
欠損径 d <sub>s</sub> (mm)	(円)5 (スリット)5,7.5,10,20	(円)30,40,50 (スリット)15	(スリット) 10,15,30,50



(a)小型土槽

(b)中型土槽



(c)大型土槽

図-2 各土槽実験で用いた試料

## 2.2 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つに大別される(図-3)。図-3中に示した空洞形状指標が大きいか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といえる。大規模な空洞とそれ以外の形状の空洞を分けるのは、欠損部での閉塞の有無であると考えられる。閉塞が発生しない場合は浸透流によって押し流されるままに土砂が流出し、大規模な空洞が形成される。

ここで、欠損閉塞を考えるにあたって導入した指標は欠損径と95%粒径の比、 $d_s/D_{95}$ である。これは、スリット砂防ダム設計指針の考え方<sup>2)3)4)</sup>を応用しており、大粒子(試料の95%粒径)により欠損が閉塞する際の粒子数を求めたものである。図-4に空洞形状指標と $d_s/D_{95}$ の関係を示す。図-4より $d_s/D_{95} \leq 1.5$ である場合には大規模空洞が発生せず欠損が閉塞している。言い換えれば、欠損に並ぶ大粒子が1.5個以下の場合に閉塞しているともいえる。これは図-5に示したように構造力学的観点より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。以上から、このことは安全側で考えれば妥当な指標であるといえる。

## 2.3 管路への土砂の流出挙動

実験で得られた土粒子濃度(流出土量を水と土の流出量で除したもの)について図-6に示す。図-6より土粒子濃度は欠損開放直後に最大値(以下最大土粒子濃度とする)をとり、その後、時間経過とともに収束する傾向がある。また、図-6から最大土粒子濃度が高ければ、大規模空洞が発生することがわかる。

ここで、土砂の流出挙動について砂防工学における土石流・掃流状集合流動が適用できると考えた(図-7)。大規模空洞においては土石流の挙動が適用できる。地盤内浸透流の速度が速いため粗い土粒子が流されることで、堆積層の土粒子がそれらによって連鎖的に巻き上がり、土粒子濃度が高くなる。一方、三日月形空洞においては掃流状集合流動の挙動が適用できる。この状態では浸透流にわずかな粒子が浮遊し流されるのみであるため、土粒子濃度が比較的低い。高橋らによれば土石流、掃流状集合流動発生時の最大土粒子濃度、 $C_*$ 、 $C_l(\%)$ は式(1)、(2)から求められる。

$$C_* = \frac{\rho \tan \theta}{(\sigma - \rho)(\tan \phi - \tan \theta)} \quad (1)$$

$$C_l \approx 0.4C_* \quad (2)$$

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。これらより求めた値と実験から得られた値を図-8に示す。図-8より三日月形空洞発生時には、実験で得られた最大土粒子濃度が $C_l(\%)$ を下回っており、大規模空洞発生時には実験で得られた最大土粒子濃度が $C_l(\%)$ を上回っている。よって、最大土粒子濃度が試料固有の $C_l(\%)$ を上回っている場合は大規模空洞が発生するといえる。

## 2.4 内部侵食発生可能性

三日月形空洞発生時に内部侵食がみられた(図-9)。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径の小さい粒子が通り抜けることであり、緩み・空洞の発生原因である。内部侵食に対する地盤の安定性の評価には、Kennyの指標<sup>6)</sup>が適用できると考えた。Kennyらの粒度安定指標においては、粒径 $D$ の移動を阻む粒子(粒径 $D$ から4倍粒径 $4D$ )の含有率( $H$ )と粒径 $D$ の含有率( $F$ )が同程度以上であれば内部侵食が発生しないと述べている。つまり、 $H/F$ が1以下であれば内部侵食が発生するといえる。なお、内部侵食が起こ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した。

実験試料にKennyの指標を適用したものを図-10に示す。図-11中において30%粒径までの範囲で各試料より求めた $H/F$ (赤線)がKennyの指標における安定境界である $H/F = 1$ (青線)を下回る場合は内部侵食が起こるといえる。図-10よりS6:4、礫では内部侵食が起こる粒子が存在し、洗い山砂では内部侵食が発生しない。空洞形状と合わせて考えると、内部侵食が発生する場合は内部侵食に対する不安定粒子の含有率が30%以上である条件である場合といえる。この際に内部侵食が発生する理由は、

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

図-3 実験結果から得られた空洞形状

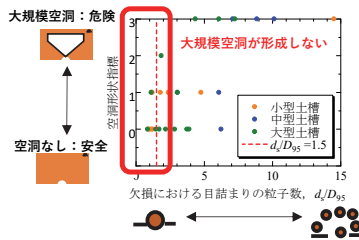


図-4 空洞形状指標と  $d_s/D_{95}$  の関係

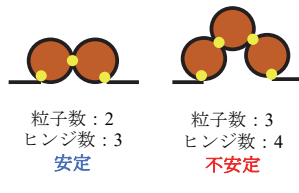


図-5 目詰まり構造の安定性

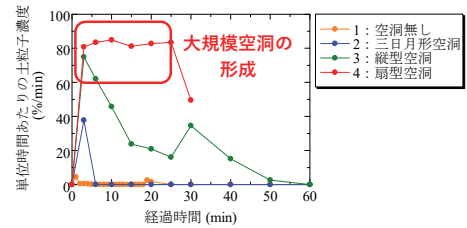
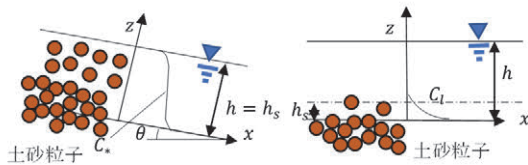


図-6 土粒子濃度



(a) 土石流

(b) 掃流状集合流動

図-7 土砂の流出挙動

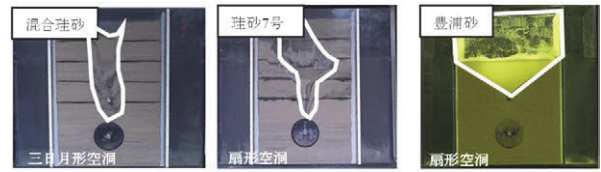


図-8 最大土粒子濃度の理論値と実測値

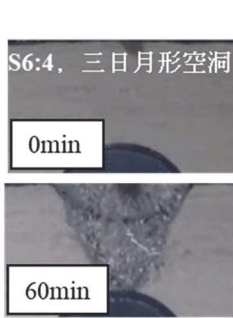


図-9 欠損部の拡大 (内部侵食発生)

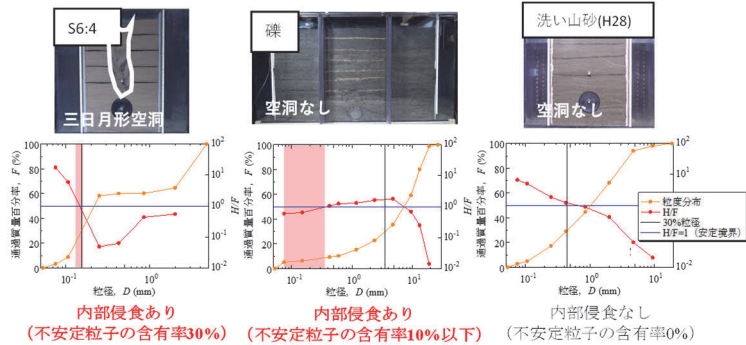


図-10 実験試料における内部侵食安定評価

不安定粒子自体が土粒子骨格を形成しているため、不安定粒子が流出すれば安定とされていた粒子も連鎖的に流出するためであると考えられる。

### 2.5 大規模空洞の範囲予測

大規模空洞において空洞高さは地下水位まで達している (図-11)。また、空洞の横幅については、浸透流の影響によって図-12 に示したように空洞の形成角度が 15~30 度になる。以上から大規模空洞の範囲を予測できる。

### 2.6 三日月形空洞の範囲予測

管路からの累積流出土量と Terzaghi の緩み土圧理論 <sup>7)</sup>

により緩み範囲が求めることができる。まず、緩み体積  $V$  について密詰めであった地盤が内部侵食時により緩みめになったと捉えて間隙比の変化を考え、式(3)により求めた。

$$V = \frac{M}{\left(\frac{1}{1+e} - \frac{1}{1+e_{max}}\right)} \quad (3)$$

ここで、湿潤土の累積流出土量  $M$ 、間隙比  $e$ 、最大間隙比  $e_{max}$  である。図-13 に式(3)により求めた値と実測値の関係を示す。図-13 より、予測値と実測値がおおよそ近い値を取ることが判明した。よって、式(3)が緩み体積を

求めるために適していることが判明した。次に、緩み幅について Terzaghi の緩み土圧理論を適用した。これはトンネル工学において利用されており、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-14 に概念図を示した。また、緩み幅 $B_0$ は式(4)より求められる。

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

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。図-15に式(4)により緩み幅の予測値と実測値の関係を示す。図-15より、今回は緩みの元を正確に測定できず大幅に離れた値となった。そのため、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ことが判明した。さらに、この理論を適用するにあたって、緩み幅を整理したが、水位が上昇すると緩み幅が増加し、水位が上昇・下降を繰り返す場合には緩み幅がさらに増加することが判明した。以上より緩み・空洞の拡大を考えるには地下水位の把握が重要であるといえる。

### 2.7 危険度評価フロー

以上の知見よりまとめた陥没災害に対する危険度評価フローを図-16に示す。

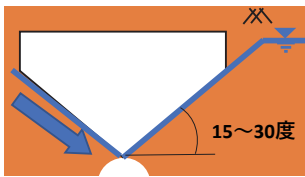


図-12 空洞の形成角度

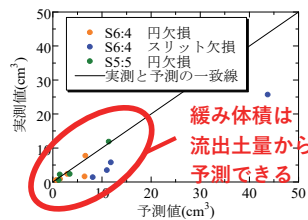


図-13 緩み体積の予測値と実測値

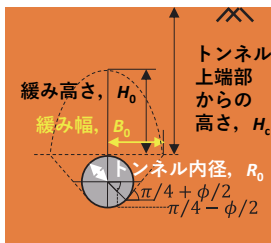


図-14 Terzaghi の緩み土圧理論における概念図

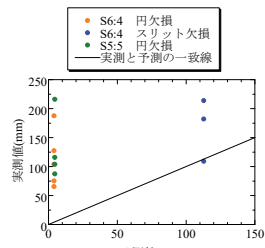


図-15 緩み幅の実測値と予測値

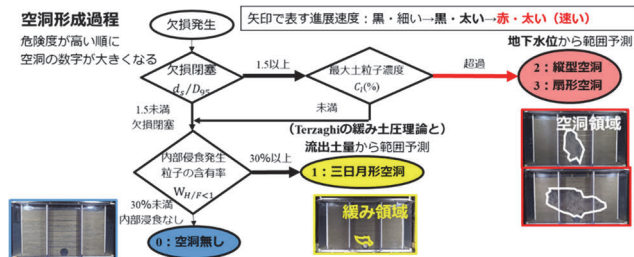


図-16 陥没災害に対する危険度評価フロー

### 3. 内水圧による陥没進展への影響

#### 3.1 実験概要

##### (1) 外水位一定試験

図-17に土槽の概略図、図-18に試料の粒度分布、図-19にKennyの指標を用いた内部侵食の安定評価の図を示す。土槽全体において飽和状態を模擬する為、欠損上部から500mmで外水位一定とする。土槽は相対密度80%で作成する。また試料は、珪砂7号、2号を重量比6:4で混合した混合珪砂(以下、S64とする)を用いる。

##### (2) 内水圧上昇载荷実験

前項の実験に続いて行う。外水位は欠損上部から100mm、300mm、500mmの3ケースで実験を行った。以下の手順で実験を行う。管に蓋をした後、水を入れて満管にし、内水圧を5分与える。その後、内水を除去して土及び水の流出量を計測する。以上の手順で内水圧の圧力水頭を変えて繰り返し内水を与える(図-20)。

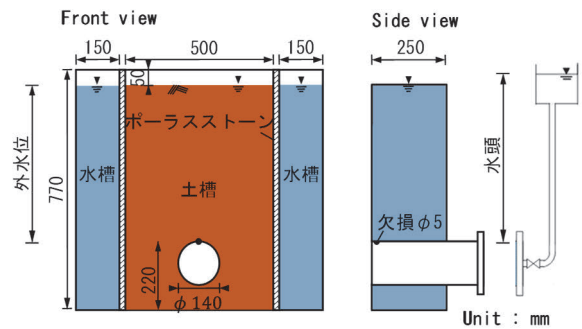


図-17 土槽実験の概略図

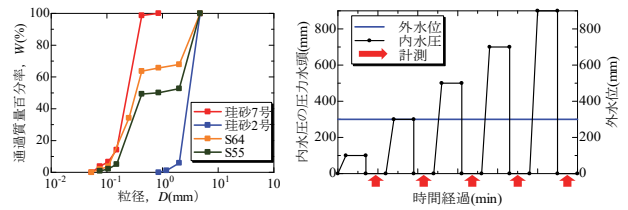


図-18 粒度分布

図-20 水頭変化グラフ

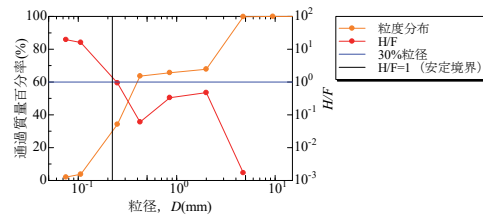
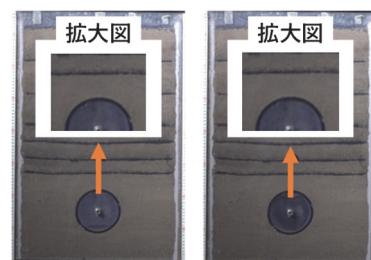


図-19 Kennyの指標を用いた内部侵食安定評価



(a)実験前

(b)実験後

図-21 外水位一定実験結果

### 3.2 実験結果及び考察

#### (1) 外水位一定試験の結果

図-22 に外水位試験実験前と実験後の土槽の様子を示す。

実験前後で欠損付近に変状はないことから、目詰まりにより欠損は閉塞し、安定な土粒子骨格を形成していると考えられる。図-19、図-20、より空洞形成過程の危険度評価フローに当てはめると、形状指標 0 の空洞無しに該当する。

#### (2) 内水圧上昇载荷実験の結果

図-23 に内水圧上昇载荷実験の実験結果を示す。欠損付近の地盤の変状に着目すると、進展に差はあるが、いずれのケースにおいても繰り返しの内水圧が作用することで内部侵食による粗粒化及び緩みが発生していることが分かる。緩みとは、内部侵食が起こることで小さい粒子が抜け出し他の部分より耐力が弱くなる部分をいう。また粗粒化とは更に侵食が進み土の細粒分が抜け落ちることによって粗粒分だけになった状態を表す。この箇所は珪砂 2 号の割合が増え、隙間の多い構造のため、内部侵食の進展は陥没発生につながる。そこで本研究では内部侵食に着目して、内部侵食の発生前と発生後に分けて考察を行った。

#### (3) 内部侵食発生前の考察

内水圧の繰り返しの上昇载荷で内部侵食が発生した。この現象を考えるにあたって、内水圧作用後の実験値による水の流速と、有効応力から算出した過剰間隙水圧比を用いて欠損付近で形成されている安定な土粒子骨格を破壊する条件を考えた。過剰間隙水圧比とは液状化の有無を表す指標として用いられ、過剰間隙水圧比を初期の有効応力で除した式で求められる。値が 1.0 を超えることで液状化したと判断される。図-24 に流速と過剰間隙水圧比の関係を示す。赤でプロットした部分は内部侵食の発生を示す。過剰間隙水圧比が 1 に近づくほど小さい流速で内部侵食が発生している。一方で、小さな過剰間隙水圧比であっても大きな流速が作用することで内部侵食が発生する。過剰間隙水圧比と流速が一定条件を満たすと内部侵食の発生を促進すると考えた。

#### (4) 内部侵食発生後の考察

図-23 より、粗粒化及び緩みが発生すると、新たに内水圧を加えることで粗粒化・緩みが進展していくことが判明した。欠損付近で内部侵食が起こることで流速にどのような変化が起きているかを確認する為に、三次元浸透流解析を行った。図-25 に解析モデル、表-1 に解析パラメータ、図-26 に解析結果を示す。解析は外水位 300mm、内水圧の圧力水頭 700mm で内部侵食の範囲を変えて行った。図-26 より、同じ内水圧を与えても内部侵食の有無によって流速の大きさが大きく異なり、管渠周辺の流速の発生範囲が増大することが確認できた。内部侵食の発生は更なる内部侵食を促進させる。

### 3.3 内水圧作用時の危険度評価

本章では、内水圧が陥没発生に及ぼす影響について検

討した。内水圧は陥没発生の原因である内部侵食の発生を助長することが明らかになった。実験結果より外水位が 300mm の場合に内部侵食は起こりやすく、地下水位の把握が重要であると考えた。また、内水圧作用後の水の流速と、欠損付近での有効応力から算出される過剰間隙水圧比が一定条件を満たすと、土の流出を促進し内部侵食が発生する。ひとたび粗粒化が起こることで繰り返しの内水圧の作用で粗粒化範囲が進展する。

	内水圧の圧力水頭					
	100mm	300mm	500mm	700mm	900mm	700mm
外水位 100mm						—
外水位 300mm					—	—
外水位 300mm						—
外水位 500mm						

図-22 内水圧上昇载荷実験

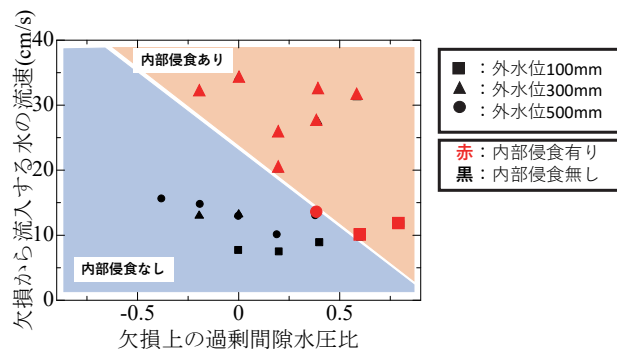
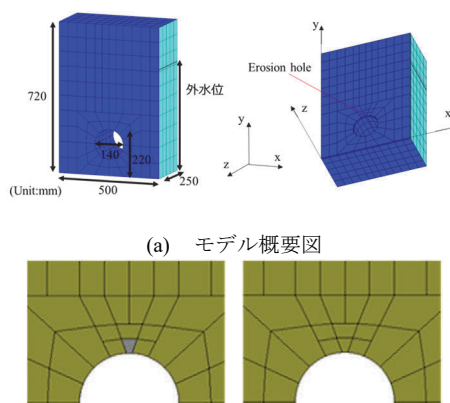


図-23 流速と過剰間隙水圧比の関係



(a) モデル概要図

(b) 損付近拡大図

図-24 解析モデル

表-2 解析パラメータ

試料	透水係数 (mm/s)	飽和体積 含水率
S6:4	0.235	0.325
粗粒化領域 (珪砂 2号)	22	0.565

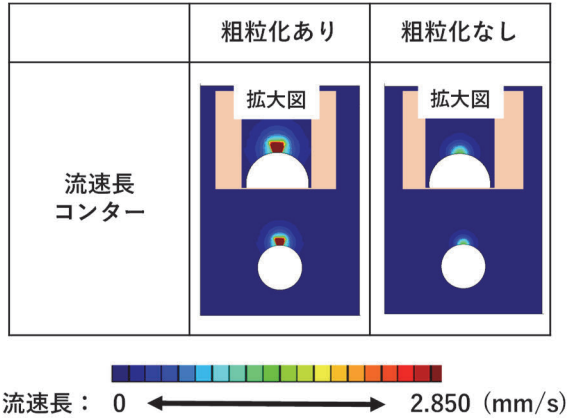


図-25 解析結果

内水圧の作用で、地表面近くの変状だけでなく、その下部にも変状が起き、内部侵食の範囲が進展していくことから、少しの欠損の拡大や水位変動が突然大きな陥没をもたらすリスクを高くする。

#### 4. まとめ

以下に本研究で得られた知見を示す。

##### (1) 空洞形成過程における危険度評価フローについて

縦型空洞や扇型空洞の様な大規模な空洞が形成される条件は、欠損閉塞の有無と土粒子濃度で決まる。欠損幅と土の95%粒径の比が1.5以上 ( $d_s/D_{95} \geq 1.5$ ) であれば欠損が閉塞せず、土粒子が連続的に流出する。また、その濃度が掃流状集合流動の濃度 ( $C_l$ ) を上回っていれば、大規模な空洞が発生する。この空洞の範囲は地下水位から予測することができる。

欠損が閉塞した場合でも三日月空洞発生の危険がある。これは Kenny らの粒度安定指標を用いた内部侵食の有無で判定できる。内部侵食に対する不安定粒子の含有率が30%以上であれば内部侵食により三日月形空洞が発生する。この空洞・緩みの範囲は Terzaghi の緩み土圧理論と流出土量により予測できる。

##### (2) 内水圧による陥没発生への影響

内水圧の作用は内部侵食の発生を促進する。第2章の危険度評価フローにおいて空洞無し、と判定された欠損上の地盤でも、繰り返しの内水圧で内部侵食が起こる。内水圧作用後の水の流速と、欠損付近での有効応力から算出される過剰間隙水圧比が一定条件を満たすことで土の流出を促進する。ひとたび内部侵食が発生することで繰り返しの内水圧の作用によって、内部侵食の範囲が進展する。陥没災害を助長する要因とし

てある一定条件を満たした場合において内水圧により内部侵食が発生する。この条件を満たす地盤においては陥没災害発生リスクが大きい。

#### 参考文献

- 1) 新井ら：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，第27回中部工学シンポジウム，pp.96-103，2015.08.07
- 2) 土石流・流木対策設計技術指針解説
- 3) 池谷ら；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
- 4) 堀内ら；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
- 5) 片出ら；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
- 6) 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
- 7) 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