

浸透流と空洞の相互作用に着目した地下水位上昇時の空洞進展メカニズム

Cavity development mechanism of the ground at groundwater level rise which focused on interaction between permeate flow and cavity

河田真弥¹, 前田健一²¹ 名古屋工業大学大学院・社会工学専攻・E-mail address 30415032@stn.nitech.ac.jp² 名古屋工業大学教授 高度防災工学センター

概 要

下水管の破損による、空洞進展を起因とした陥没災害は年間約 3300 件発生しており、本研究では、地下水位の上昇を考慮した管渠周辺地盤中の空洞進展のメカニズム解明に向けモデル実験を行なった。その結果、水位を段階的に上昇させても、空洞は欠損の大きさによって進展する場合としない場合に分けられ、進展する場合では、水位を上昇させた直後に急激に進展し、横長の空洞が形成された。また、土中の水の流れが空洞進展に大きな影響を与えていることが実験により判明したが、土中の水の流れを測定するのは困難である。そこで、三次元飽和・不飽和浸透 FEM 解析を実施し、浸透流が空洞進展に与える影響を調べた。その結果、空洞が進展すると、空洞上部での水位が下がるため、水頭が小さくなり、縦方向への進展が止まるが、空洞側部では水頭の変化は無く、土を押し流す流れの低下はないために、空洞は横に進展し、最終的に横に長い空洞が形成されるという事が判明した。

キーワード：空洞，陥没，管渠，浸透流，地下水位

1. はじめに

都市部をはじめとする全国各地で、下水管の損傷を起因とする陥没災害は年間約 3,300 件発生しており、今後下水管の老朽化によってその発生件数は増加すると予測されている。空洞探査や陥没発生箇所からは、陥没災害の原因となる空洞が埋設管周辺に存在していることが報告されており、既往の実験結果から、地下水位の高さや、下水管の欠損の位置が空洞進展に大きな影響を及ぼすことがわかっている。しかし、地下水位の変動が空洞進展にどのような影響を及ぼすのかは考慮されておらず、さらに実際に水の流れが空洞にどのような影響を与えるのかは明らかになっていない。

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、埋設管周辺地盤中の空洞進展メカニズムの解明に向けてモデル実験を行なった。また、得られた実験結果をもとに三次元飽和・不飽和浸透 FEM 解析を実施し、水位の上昇が空洞進展に与える影響を調べた。また、同様に、欠損の大きさの違いが管渠周辺の地盤に与える影響についても考察を行なった。

2. 水位上昇実験

2.1 実験概要

図 1 に管渠周辺の陥没モデル実験機の概略図を示す。こ

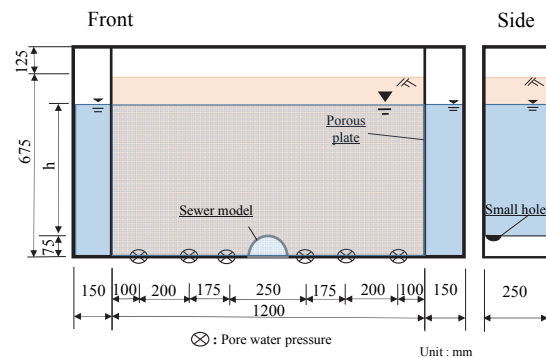


図 1 管渠周辺実験モデル

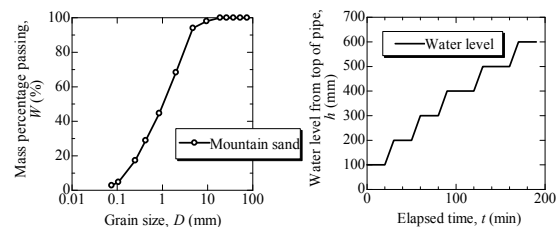


図 2 粒度分布

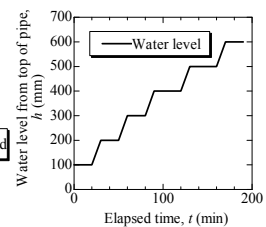


図 3 水位条件

の実験機は、両側にある給水槽を操作することで、水位を自由に変えることができる。また、土槽下部に半径 75mm の模擬管渠（上半円）を設置し、地下水位下での下水管の破損を模擬した。模擬管渠の欠損は、欠損位置を底面からの角度 $\theta = 90^\circ$ （以下、管頂部と称す）の $\phi 50 \text{ mm} \phi 40 \text{ mm}$

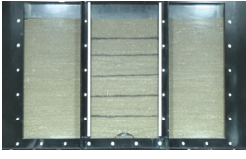
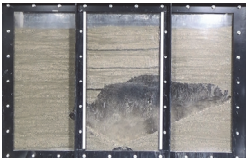
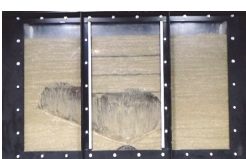
ケース名	空洞の様子
$\phi = 30\text{mm}$	 190min経過 (水位60cm)
$\phi = 40\text{mm}$	 88min経過 (水位40cm)
$\phi = 50\text{mm}$	 127min経過 (水位50cm)

図4 実験終了後の様子

と $\phi 30\text{mm}$ の円形のものを用了。

また、試料は管路の埋戻しとして一般的に使用される山砂を用了。山砂の粒度分布は図2に示す。透水係数 k は $k=5.38 \times 10^{-5} \text{ m/sec}$ である。供試体は締固め度を90%に調整し、作成した。

図3に実験の水位条件を示す。本実験では、飽和状態で供試体を作成した後、水位を管上10cmまで下げ初期状態とし、そこから段階的に管頂からの水位 h を上昇させた。

2.2 実験結果及び考察

図4に実験終了時の土槽の様子、図5に進展の模式図、図6に各ケースでの単位時間当たりの水の流出量、図7に土の流出量、図8に流出した土粒子の質量濃度の経時変化を示す。

まず、欠損管頂部 $\phi 50\text{mm}$ のケースについて、水位が管上10cmから20cmまでは大きな進展は見られなかったが、水位30cmから40cmに上昇させた際に、大きな進展が見られた。図5に示すように、空洞は縦に進展した後、横に広がっていき、最終的には図4に示すような横長の空洞が

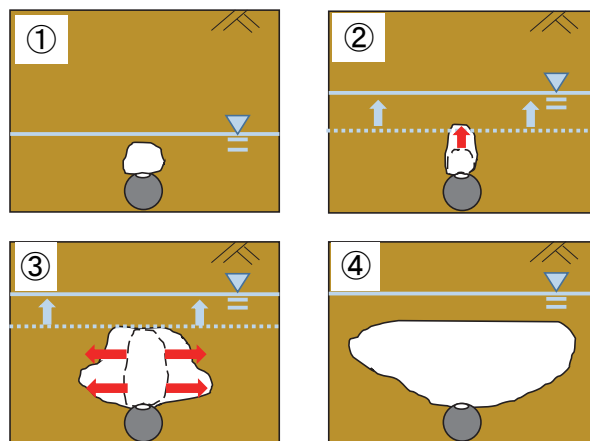


図5 水位上昇時の空洞進展の様子

形成された。

欠損管頂部 $\phi 40\text{mm}$ のケースでは、水位が管上10cmから20cm時には、空洞の進展は見られなかったが、水位を30cmから40cmに上昇させる際に、欠損管頂部 $\phi 50\text{mm}$ のケースと同様に大きな進展が見られ、最終的には図4に示す横長の空洞が形成された。図7を見ても明らかな通り、欠損管頂部 $\phi 50\text{mm}$ のケースと比較して低い水位で空洞が進展した。この理由として、図6から、欠損が $\phi 40\text{mm}$ のケースでは、水位が低い段階から $\phi 50\text{mm}$ のケースと比較して、水の流出量が多く、この水の流出量の差が空洞進展の速度の差につながったのではないかと考えられる。

欠損管頂部 $\phi 30\text{mm}$ のケースでは図6、図7を見ても明らかな通り、水は断続的に流出したが土の流出は見られなかった。これは、欠損部に目詰まりが発生しており、空洞の進展を妨げていたためである。同ケースで水位60cm時に欠損部に軽い振動を加えたが、すぐに目詰りが発生し、進展がとまった。このことから、山砂に対して欠損の直径が30mm以下では水位を上昇させても目詰まりが発生するため、空洞が進展する可能性は低くなる。

図7から空洞の進展したケースの共通点として、水位を上昇し終わると同時に著しい空洞の進展が始まっていることが挙げられる。この理由として、図6を見ても明らかなように、水位の上昇とともに水の流出量が増加したことが考えられる。また、空洞の進展が見られたケースでは、一時的な流出量の低下が見られるが、これは急激な土の流出が発生したことによる一時的な目詰まりの影響である。

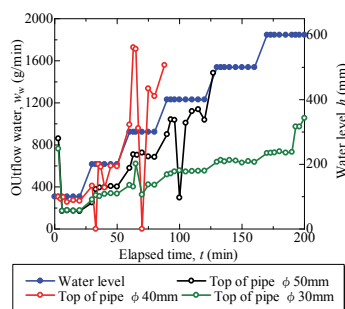


図6 水の流出量

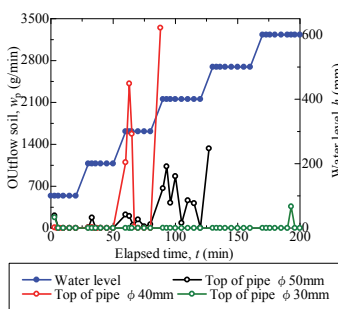


図7 土の流出量

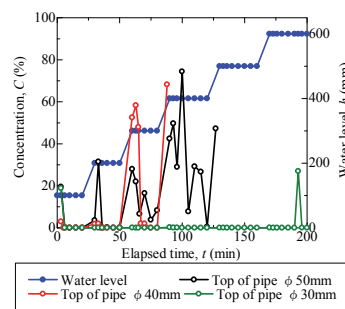


図8 流出した土粒子の質量濃度

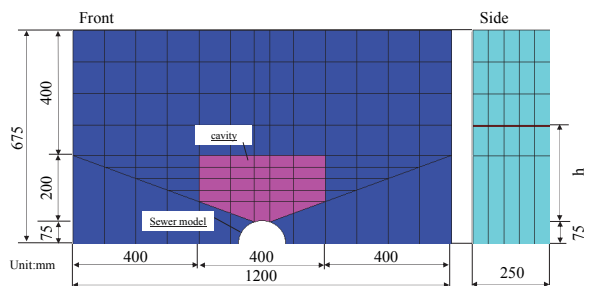


図9 水位上昇解析の概略図

また、図8に示した、流出した土粒子の質量濃度の経時変化から、空洞が進展したケースにおいて、空洞が大きく進展した水位では土粒子の流失濃度が50~70%を推移していることがわかった。過去の研究から、空洞が進展する場合には50~70%を推移することが判明しており¹⁾、今回得られた結果はおおむね妥当であると言える。

3. 三次元浸透流解析

3.1 水位上昇が空洞進展に与える影響

3.1.1 解析概要

図9に水位を上昇させた解析モデルの概要図を示す。

図9の解析モデルは、図1に示した実験装置を用いた水位上昇実験において、欠損管頂部で欠損径が50mmのケースで、水位30cm時に形成された空洞を模擬したものであり、要素は6760個、節点は8673個で、パラメータの一つである透水係数は0.08mm/secとした。水位管上30cmと管上50cmでそれぞれ定常解析を行なった。

3.1.2 解析結果

図10にモデル前面から10mmの位置での流速ベクトル図を示す。倍率は100倍で作成した。

図10の流速ベクトル図より、水位30cm時では空洞側面の下部に大きな流速が集中している。一方で、水位50cm時では、空洞側面の広い範囲に、土を押し出す向きに大きな流速が分布しているのが分かる。また、流速の最大値は、水位30cm時で0.19mm/sec、水位50cm時で0.33mm/secであった。さらに、両ケースとも、流速が最大であった箇所は、空洞側面の下部で、水位30cm時では透水係数の約2倍、水位50cm時では透水係数の約4倍の流速が発生して

いたことになり、水位が上昇すると流速の最大値も大きくなることが判明した。

ここで、空洞の上部に着目すると、両端で水位を上昇させても、空洞の上部では流速の上昇がみられないことが分かる。この理由として、両端で水位を上昇させても、空洞の側面に水が流れ込んでしまうことが挙げられる。そのため、空洞の側面に流れが集中し、空洞がさらに横へ進展しやすくなると考えられる。実際の実験でも横長の空洞が見られたのは、このためであったと思われる。

3.2 欠損径が管渠周辺地盤に与える影響

3.2.1 解析概要

図11に解析モデルの概要図を示す。

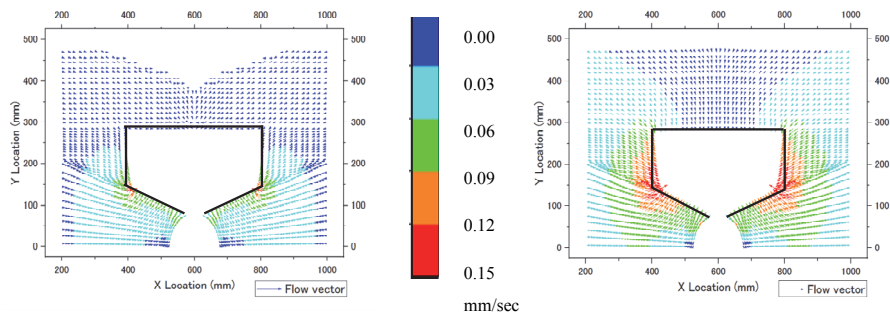
図11に示した解析モデルは、図1に示した実験において、空洞が進展する前の状態を模擬したものである。水位管上50cmで、欠損位置が管頂部φ30mmのモデルと、同じ水位で欠損管頂部φ50mmのモデルを作成し、定常解析を行なった。各種パラメータは3.1の解析と同一である。

3.2.2 解析結果

図12に解析結果から作成した圧力水頭のコンター図を示す。また、図13にモデル前面から10mmの位置での流速ベクトル図を示す。倍率は50倍で作成した。

図12より、欠損が管頂部φ50mmのケースでは、管頂部φ30mmのケースと比較して、全体的に圧力水頭が小さくなっている範囲が大きく、図中の水色の線で示される水位が低くなっているのが分かる。管頂部φ50mmのケースでは、欠損の面積が大きいため、流れ込む水の量が多くなったためであると考えられる。対して管頂部φ30mmのケースでは、欠損の面積が小さいため流れ込む水の量が小さく、水位が下がりにくい。

また、管頂部φ50mmのケース流速の最大値は0.790mm/secであった。対して、管頂部φ50mmのケース流速の最大値は0.875mm/secであり、欠損が小さいケースのほうが流速の最大値が大きいという結果になった。この理由として、欠損が小さい場合では水位が下がりにくいため、欠損からの水頭が、比較的高く保たれることが挙げられる。対照的に欠損が大きな場合は、水位が下がりやすいため、欠損からの水頭が低くなり、流速は小さくなる。しかし、図13を見ても明らかな通り、流れ込む水の量が多いため



(a) 水位管上30cm

(b) 水位管上50cm

図10 水位上昇時の流速ベクトル図

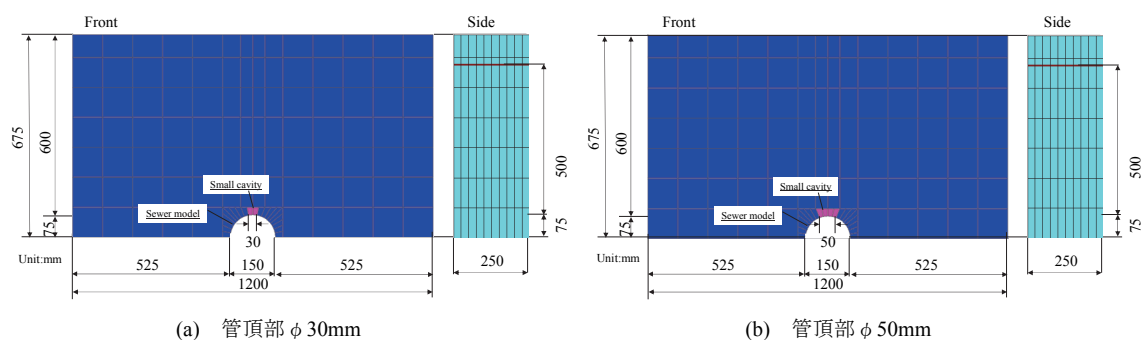


図 11 解析モデル

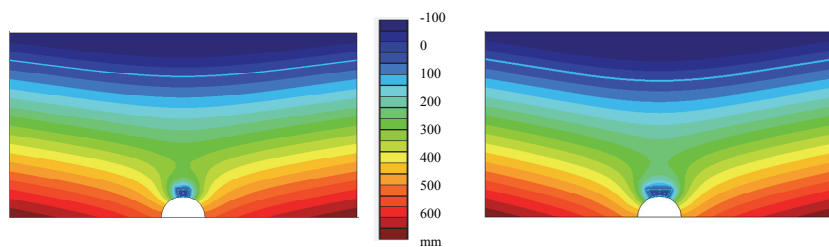


図 12 圧力コンター図

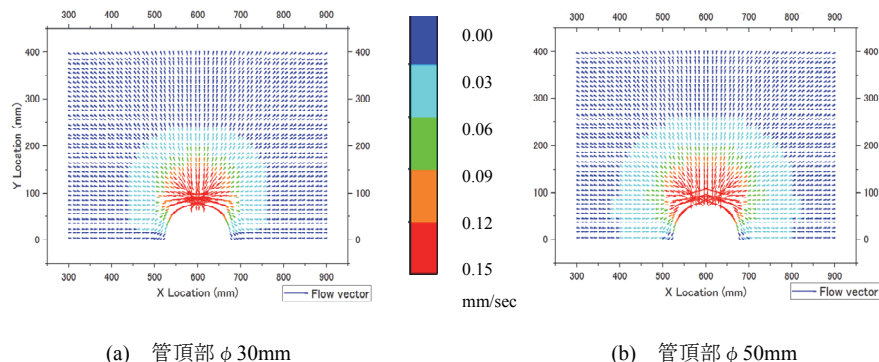


図 13 流速ベクトル図

流速が発生している範囲が広がっているのがわかる。実際の実験でも、欠損が大きい場合には、大きな空洞が見られたが、これは欠損部において目詰まりが発生しにくく、広い範囲で流速が発生するためである。また、欠損が小さい場合は、水頭が下がりにくいため、流速が維持されやすいが、実験では、欠損部に目詰まりが発生し空洞の進展は見られなかった。しかし、目詰まりが生じない範囲で欠損が小さい場合では、欠損が大きい場合と同様に進展する可能性がある。

4. まとめ

水位を段階的に上昇させる実験から、欠損の大きさによって空洞が進展する場合としない場合に分けられることが明らかになった。また、浸透流解析から空洞進展と地下水の流れが密接に関係していることが明らかになった。地下空洞を起因とした陥没災害を防止するため、以下の点に留意する必要がある。

1) 空洞が進展する場合において、水位を上昇させた直後

に急激に進展する。実現場において地下水位の変動が顕著な地点では注意が必要である。

- 2) 空洞がある地盤において、空洞側面の下部に流速は集中し、水位が上昇すると、空洞側面において土を押し出す向きの流れが大きくなるため、空洞は横に進展しやすくなる。そのため、空洞が下水管上のみでなく、広範囲に及ぶ可能性がある。
- 3) 欠損が大きい場合には、広範囲に流速も生じるため大きな空洞が形成されやすい。欠損が小さい場合は、流れが発生する範囲自体は小さくなるが、水位が下がりにくいため、流速が持続しやすい。そのため、欠損が大きい場合と同様に空洞が進展する可能性がある。下水管の破損を起因とする地下空洞の危険度判定として、管渠の欠損面積のみを用いるのは不十分である。

参 考 文 献

- 1) 田坂晃一，河田真弥，前田健一，川田卓嗣，渡辺完弥：管渠周辺地盤における空洞進展と陥没発生メカニズム，第29回中部地盤工学シンポジウム，pp.42-45，2017