

直接打設型地下水流向流速計を用いた地盤内における管路損傷発見手法に関する研究

河野 篤樹¹⁾・山本 浩一²⁾

¹⁾山口大学工学部, ²⁾山口大学大学院創成科学研究科

1.研究背景・目的

近年、我が国では管路の老朽化が進行しており、管路損傷に起因する事故が各地で報告されている。管路損傷は、周辺インフラへの影響を引き起こす可能性があり、社会的課題となっている。下水管の場合、管路の破損部分に向かって地下水が流動することになる。これは、管の内外で水圧に差が生じるためで、水圧の高い地盤側から水圧の低い管内へと地下水が移動するため発生する。このような地下水の管路内流入に伴い、周辺地盤内の地下水流动は局所的に乱されると考えられる。したがって、地下水流向流速測定により管路損傷を検知することができる可能性がある。しかし、既存の地下水流向流速計は観測井の設置が必要で現場への適用に制約が多い。そこで、本研究では、現地計測が可能な直接打設型地下水流向流速計を開発し、地下水流計測により管路損傷を発見する手法を確立することを目的とした。

2.方法

2.1 鉛直 2 次元マイクロ PDV

地盤内における鉛直断面における流向・流速を測定するため、鉛直 2 次元マイクロ PDV(マイクロ PDV)を開発した。マイクロ PDV の実画像を図 1 に示す。マイクロ PDV は、半径 15 mm、長さ 1 m のアルミ製丸棒から構成され、底面から 5 cm の位置に測定孔を設けた。孔内部にスポンジおよび染料インクで 2 mm の円(ドット)を印刷したペーパーディスク (12 mm×29 mm) を設置した。地下水流动が存在する場合、ドットからインクが溶出し、流下方向にインクが滲んだ軌跡(テーリング)が発生する。

2.2 画像解析方法

測定して得られたペーパーディスクをフラットベットスキャナでペーパーディスクをスキャンし、電子化した。画像を RGB 分解したのち、Blue の輝度を用いて、ドット・テーリングを抽出した。ドット抽出のための閾値は 105、テーリング抽出のための閾値は 195 とした。画像データの解析例を図 2 に示す。

2.3 室内実験

2.3.1 流速評価実験

本実験では、インクを用いた地下水流动測定を行ったが、インクと地下水の密度差より、地下水流动とは独立した鉛直方向の移動が生じる可能性がある。そこで、本研究では鉛直流成分の影響を評価し、補正を行った。さらに、水平方向のテーリング長を指標として地下水流速の検定を行い、テーリング長と流速の関係につ



図 1 マイクロ PDV



図 2 解析例

いて検討を行った。本実験における地下水流动のイメージ図を図3に示す。実験砂槽(幅120 cm×奥行き51 cm×高さ50 cm)には地盤材料として珪砂5号(透水係数k=7.8 cm/min)を充填した。水流の制御にはポンプを用い、砂槽の上流側から下流側へ向けて定常的な流れを発生させた。測定位置は地表面から深度30 cmとし、流速条件は0.1, 0.08, 0.06, 0.04, 0.02, 0 cm/minの計6段階に設定した。

2.3.2 管路損傷を模擬した地下水流向流速実験

本実験では、管路損傷時における地下水挙動を再現し、マイクロPDVを用いて流向・流速分布を測定した。実験の概略図を図4に示す。砂槽両端に設置した水槽をホースで水理的に連結し、サイフォンの原理を用いて水位を等しく保つことで、砂槽全体に水位勾配が生じない境界条件を設定した。これに、管路模型内部の地下水をポンプにより排水することで、破損箇所に向かって地下水が流动する条件を再現した。管路模型の設置深度は30 cm、ポンプ流量は215 cm³/min、計測時間は5分間とした。計測は深度10, 20, 30 cmの3断面において行い、計27地点で流向・流速データを取得した。地盤材料には珪砂5号を用いた。

2.4 テーリング長計算方法

実験の結果は以下の方法でテーリング長を算出した。

$$dx = x_t - x_d \quad (1)$$

$$dz = z_t - z_d \quad (2)$$

ここで、テーリングの重心座標を(x_t, z_t)とし、ドットの重心座標を(x_d, z_d)、テーリング長の重心変位dx・dzをテーリング長の重心変位(cm)とし、これを実験時の流速(ダルシ一流速)と比較した。

3.結果および考察

3.1 流速評価実験

水平変位dxと鉛直変位dzの関係を図5に示す。図5から、両者に明確な相関関係は見られず、鉛直流は水平流に付随した成分でないことが示され、鉛直変位には地下水流动に起因しない成分が含まれている可能性がある。そこで本研究では、鉛直変位dzに含まれる鉛直成分を流速条件に依存しない系統的な成分として扱い、定数項として平均値による補正を行った。具体的には、各実験条件におけるdzの平均値を算出し、これを実測データから差し引くことで、鉛直方向の定常成分を除去した。

また、水平変位dxと地下水流动の関係を図6に示す。図6から、テーリング長と流速の間に正の相関が確認された。よって、回帰式よりテーリング長から流速を算出可能であると考えられる。

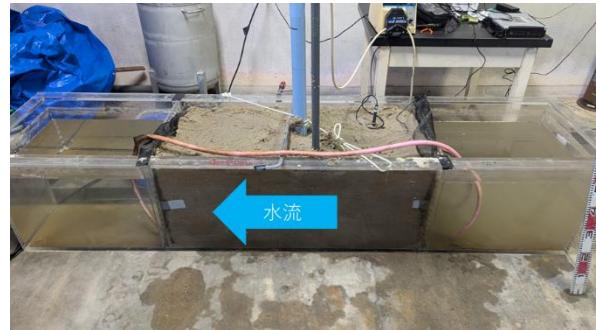


図3 地下水流動のイメージ図

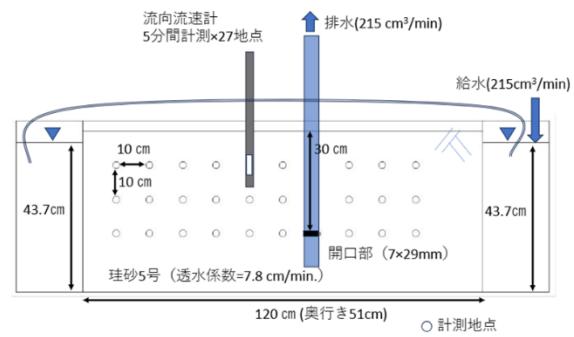
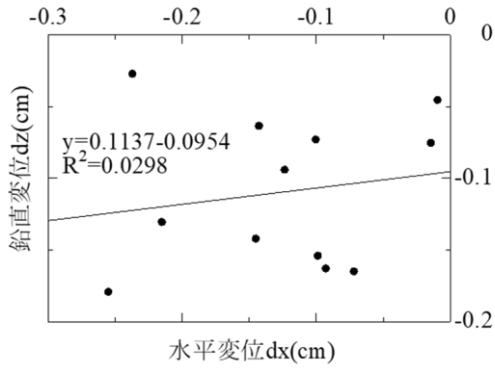
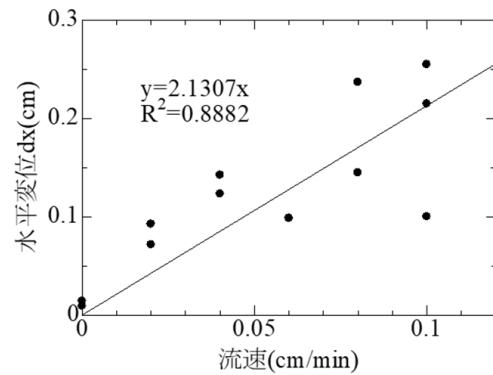


図4 実験概略図

図 5 水平変位 dx と鉛直変位 dz の関係図 6 流速と水平変位 dx の関係

3.2 管路損傷を模擬した地下水流向流速実験

実験で得られた流向・流速分布を図 7 に、地下水流动計算ソフト(HYDRUS3D)による流向流速の数値計算結果を図 8 に示す。両図を比較すると、破損箇所付近での流向の急変や大まかな収束傾向はおおよそ一致していることが確認された。

次に、実測値と数値計算結果を評価するため、実測値とモデル値の水平流速における相関係数のコンター図を図 9 に示す。図 9 から、 $x=70$ cm 付近において相関係数が相対的に高い値を示していることが確認できる。この結果は、当該領域において実測値とモデル値の水平流速分布が類似した傾向を示していることを意味している。また、流向の一致度を評価するために、 $\cos \theta$ の鉛直断面内分布図を用いた検討を行った。数値モデルの流速ベクトル \vec{a} と実測流速ベクトル \vec{b} のなす角を θ としたときの $\cos \theta$ の鉛直断面におけるコンター図を図 10 に示す。ベクトルの向きが一致しているほど $\cos \theta$ は 1 に近い値をとる。図 10 より、 $x=70$ cm 付近において $\cos \theta$ の値が高い領域が確認され、この領域では実測値とモデル値の流速ベクトルの向きが良好に一致していることが示唆される。

相関係数と $\cos \theta$ のコンター図の双方が、 $x=70$ cm 付近でピークを示したことは、当該位置において流速・流向ともに実測と解析が整合していることを裏付けている。この一致は、管路損傷による地下水流动の特徴を捉えていることを示唆しており、管路破損箇所の位置推定に有効な情報を与える可能性がある。

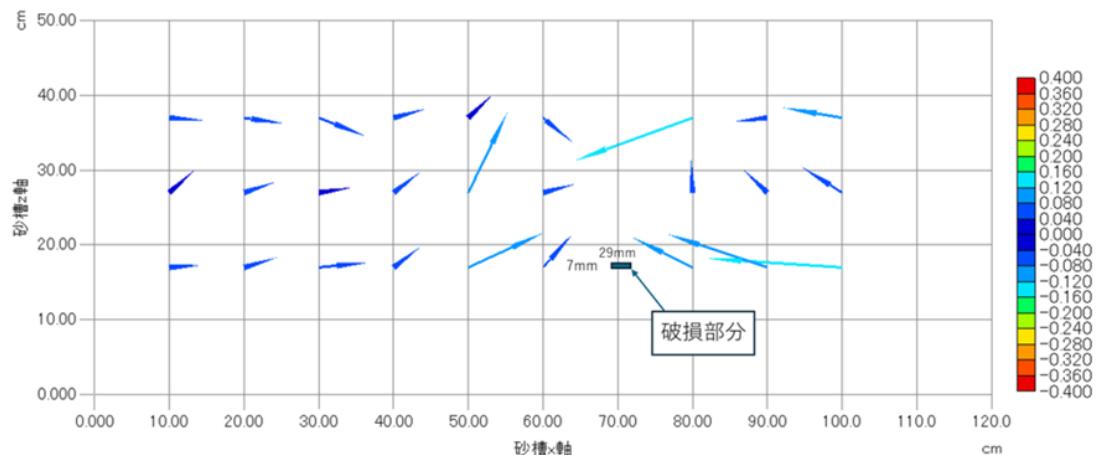


図 7 実験で得られた流向・流速分布図

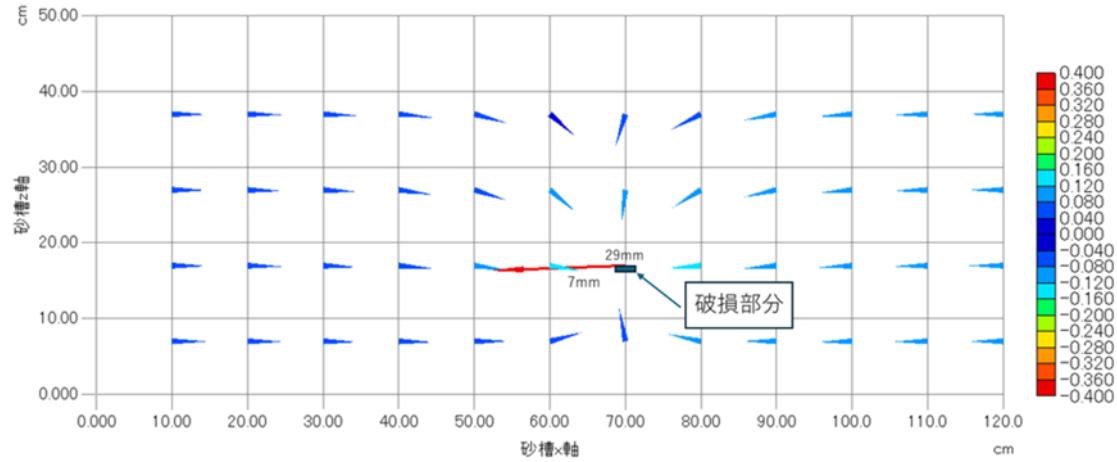


図 8 地下水流動計算ソフト(HYDRUS3D)による流向流速の数値計算結果

Correlation coefficient of measured and simulated horizontal velocity

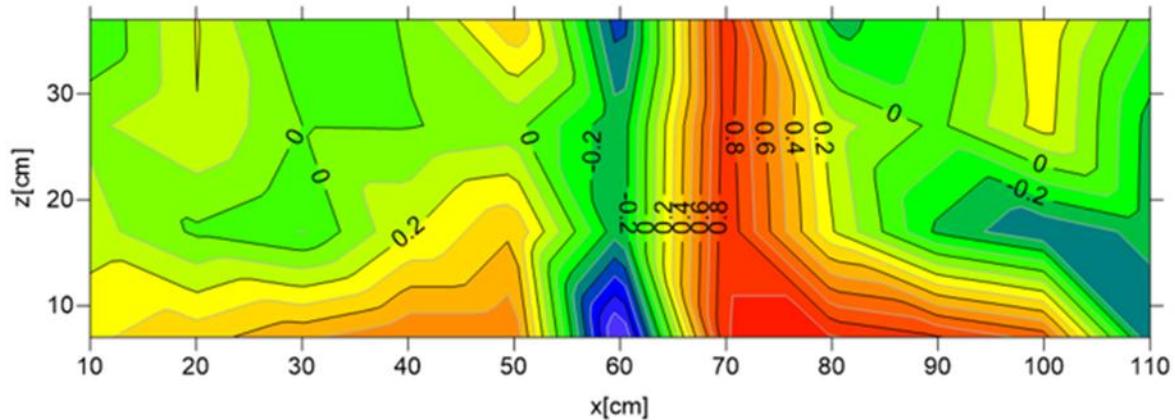


図 9 水平流速の相関係数のコンター図

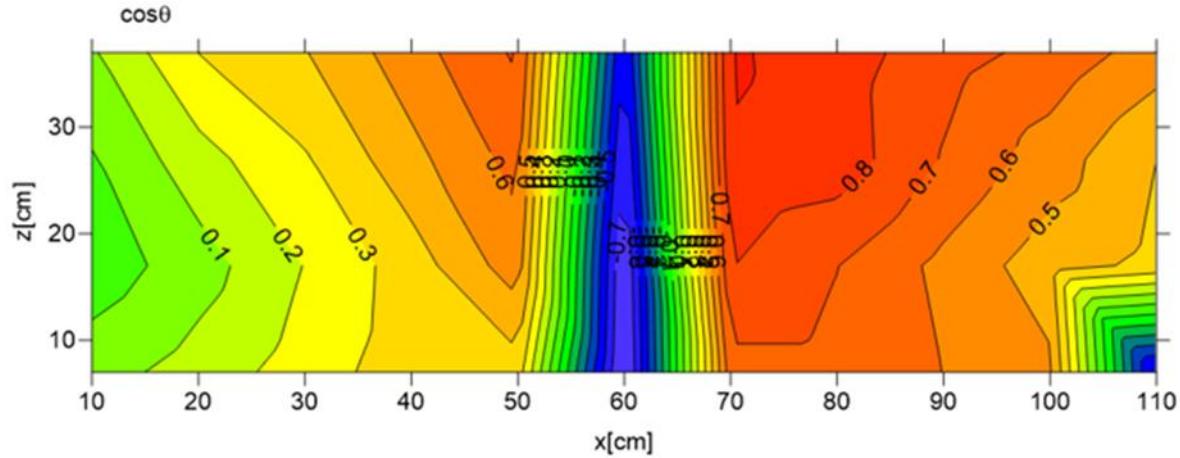


図 10 $\cos \theta$ の鉛直断面におけるコンター図

4.結論

本研究では、マイクロ PDV を用いて地盤内の地下水流动を測定し、管路損傷に起因する地下水挙動の把握を試みた。鉛直二次元断面内における複数地点での流向・流速計測の結果、破損箇所近傍において流向の変化および流れの収束が確認され、管路破損箇所を特定できる可能性が示唆された。