

# 数値解析による矢板引抜きを考慮した 管水路の挙動検討

寒地土木研究所 水利基盤チーム ○川辺 明子  
小野寺康浩  
室蘭開発建設部 胆振東部農業開発事業所 狩野 誠二

土中における管水路の挙動推定を目的とした汎用的な解析手法の検討の一環として、有限要素法を用いて矢板施工断面における施工中から施工後の管体と周辺地盤の挙動を検討した。解析では、施工過程を考慮したステージを設定し、矢板引抜きによって生じる空隙には左右の地盤が側方変位して閉塞すると仮定した手法を用いた。その結果、この解析手法により矢板引抜き後の管体の沈下やたわみの基本的な挙動を把握できることが確認された。

キーワード：管水路、矢板施工、有限要素法、大口径管

## 1. まえがき

管水路の施工では、施工中から施工後において管体や周辺地盤に沈下や変形の挙動が生じることがあるが、その機構の詳細は解明されていない。そのため施工にあたり管体や周辺地盤の沈下や変形の予測が実際と異なる場合がある。

筆者らは、大口径管水路の挙動を把握するために、口径や地盤条件が異なる区間において施工中および施工後の原位置観測を行っている。しかし、原位置観測で得られるデータは管の口径や周辺地盤等の条件が限定されているため、それらのデータを考慮した管水路の挙動を推定する汎用的な手法が求められている。

本論では、様々な条件下における管水路の挙動を推定する手法として有限要素法解析（以下、FEM解

析と称する）を用い、矢板施工断面の施工中から施工後の管体および周辺地盤の挙動について検証を行った。

## 2. 原位置観測の概要

### (1) 観測箇所

管体の原位置観測は、仮設鋼矢板土留め施工で埋設された原地盤の土質条件等が異なる2箇所のFRPM管路(4種管、単管長4,000mm)で行っている。以下では、平成18年度に口径2,200mmの管を施工し観測を開始した区間をa区間、平成19年度に口径2,000mmの管を施工し観測を開始した区間をb区間とする。a、b区間の施工断面と原地盤の土質柱状を図-1に示す。

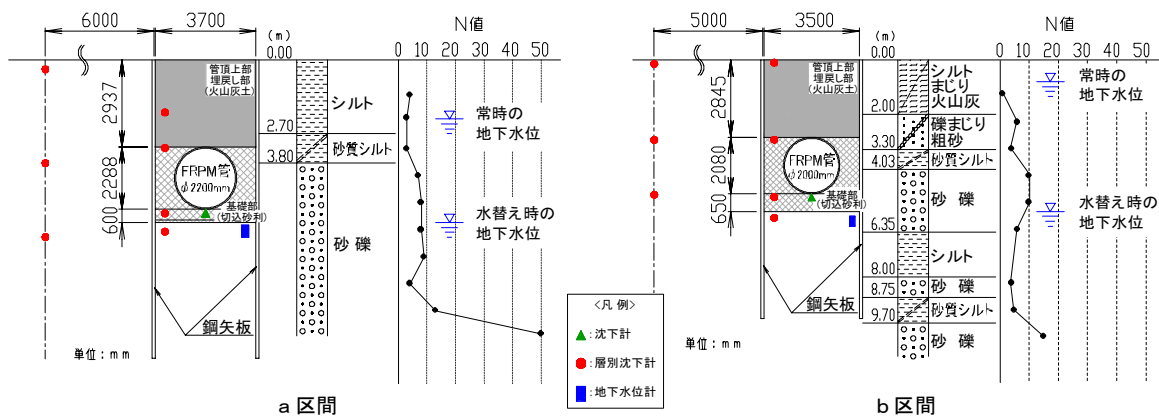


図-1 施工断面と土質柱状

a 区間の原地盤は、地表面下約3.8mまでが軟弱な粘性土層でそれ以深はルーズな砂礫層である。おおむね管心高より上部は極めて軟弱であるが、管心高より下部は上部に比べて支持力が高い。常時の地下水位は地表面から約2mの位置にある。

b 区間の原地盤は、管側部および管底部の下方に軟弱な粘性土層を有する地盤である。地表面から約3.3mまでが軟弱な火山灰土層と砂質土層で、それ以深は約9mの軟弱な粘性土と砂礫の互層になっている。地下水位は、常時は地表面下約80cmの位置にある。

a、b 区間とも、原地盤は常時の地下水位が高く管側から管底部にかけてN値10以下の軟弱な層が堆積していることが共通している。しかし、b 区間はa 区間に比べ多層で複雑な構成であり、管側のN値はやや高く管底以深のN値は低い。

管体基礎部は、φ30mm級の切込砂利を用いて施工支持角360°（締固め度90%程度）で布設し、管頂より上部の埋戻しには火山灰土を用いた。基床厚は、

a 区間は60cm、b 区間は65cmである。矢板の引抜きは、埋戻し完了段階にバイブロハンマーで行った。

両区間の観測対象管は、施工中を除くと常に地下水位以深にある。

## (2) 観測内容

観測箇所では図-1 に示すように沈下計等の観測機器を配置し、施工中から施工後の管体の沈下量、管周辺地盤(矢板内側と外側)の鉛直変位量、地下水位の測定を継続中である<sup>1)、2)</sup>。

## 3. FEM解析

### (1) 解析モデル

FEM解析は、軸対称モデルを用いて線形弾性解析(2次元平面ひずみ)で行った。解析には、弾塑性地盤解析プログラム(GeoFEAS 2D、(株)フォーラムエイト製)を使用した。

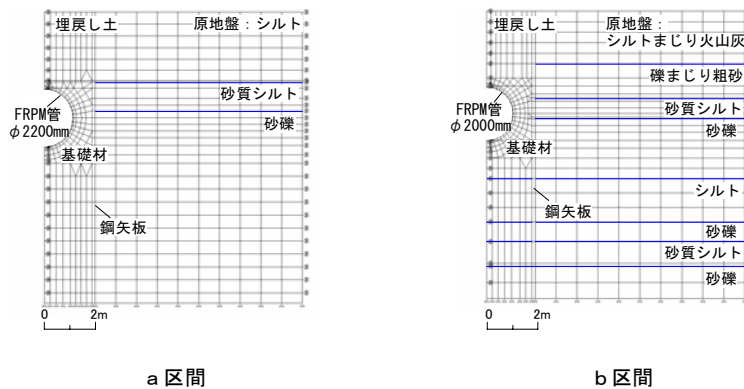


図-2 解析モデル

表-1 解析に用いた物性値

要素		物性値	変形係数 E (kN/m <sup>2</sup> )	ポアソン比 ν	湿潤単位体積重量 γ <sub>t</sub> (kN/m <sup>3</sup> )	飽和単位体積重量 γ <sub>sat</sub> (kN/m <sup>3</sup> )
管	FRPM 4種 φ2200mm		1.52 × 10 <sup>7</sup>	0.2	19.61	—
	鋼矢板Ⅲ型		2.0 × 10 <sup>8</sup>	0.15	76.98	—
埋戻し部	基礎材		1.4 × 10 <sup>4</sup>	0.2	19.36	21.44
	埋戻し土		2.3 × 10 <sup>3</sup>	0.45	17.71	18.39
原地盤	シルト		2.3 × 10 <sup>3</sup>	0.4	17.71	18.39
	砂質シルト		9.5 × 10 <sup>3</sup>	0.3	16.61	19.49
	砂礫		1.05 × 10 <sup>4</sup>	0.25	18.59	20.03

要素		物性値	変形係数 E (kN/m <sup>2</sup> )	ポアソン比 ν	湿潤単位体積重量 γ <sub>t</sub> (kN/m <sup>3</sup> )	飽和単位体積重量 γ <sub>sat</sub> (kN/m <sup>3</sup> )
管	FRPM 4種 φ2000		1.52 × 10 <sup>7</sup>	0.2	19.61	—
	鋼矢板Ⅲ型		2.0 × 10 <sup>8</sup>	0.15	76.98	—
埋戻し部	基礎材		1.5 × 10 <sup>4</sup>	0.2	18.41	20.82
	購入土		7.17 × 10 <sup>3</sup>	0.4	11.73	14.01
原地盤	シルトまじり 火山灰		5.0 × 10 <sup>3</sup>	0.4	12.60	15.15
	礫まじり粗 砂		1.4 × 10 <sup>4</sup>	0.3	16.00	16.59
	砂質シルト		2.08 × 10 <sup>3</sup>	0.4	17.28	17.35
	砂礫		1.88 × 10 <sup>4</sup>	0.3	16.45	18.04
	シルト		3.65 × 10 <sup>3</sup>	0.4	17.63	17.67
	砂礫		1.2 × 10 <sup>4</sup>	0.3	16.45	18.04
	砂質シルト		7.5 × 10 <sup>3</sup>	0.4	17.63	17.67
砂礫		2.55 × 10 <sup>4</sup>	0.25	18.50	19.06	

表-2 解析ステージと施工段階

解析ステージ	矢板引抜き前・後	施工段階	地下水水位
A	前	原地盤掘削後	原地盤掘削面
B		管体、管基礎材施工後	原地盤掘削面
C		地表面までの埋戻し完了後	原地盤掘削面
D	後	矢板引抜き後	原地盤掘削面
E		地下水水位が常時水位まで回復	a区間:地表面下約2m b区間: " 約80cm
F		地下水水位が地表面まで上昇	地表面

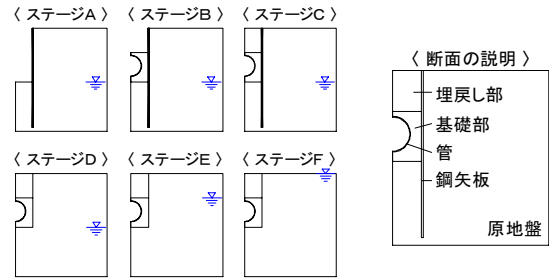


図-3 解析ステージの断面

解析モデルを図-2 に、解析に使用した物性値を表-1 に示す。解析モデルは、原位置観測箇所の地盤構成を再現するように作成し、埋戻し部および原地盤の物性値は三軸圧縮試験等の土質試験結果やボーリングデータを考慮して決定した。

(2) 解析手法

解析は、管水路の施工過程と地下水水位の変動を考慮し、矢板引抜き前後の管内空虚状態における6段階について検討した(表-2、図-3)。

矢板引抜き前後における挙動解析では、矢板と地盤のすべりを考慮してジョイント要素を採用する方法<sup>3)</sup>等があるが、今回の解析では次のように扱った。

- i 矢板引抜き前は、埋戻し部と原地盤の間に矢板の要素を設定した。
- ii 矢板引抜き後は、引抜き跡の空隙部に向かって埋戻し部と原地盤から側方変位が生じると仮定し、矢板の要素が閉塞するように埋戻し部と原地盤を水平方向に強制変位させた。

強制変位量は図-4 のケース①~③に示すとおりである。なお、矢板要素の幅は125mmとし、引抜き後は物性値を有さない要素として扱った。

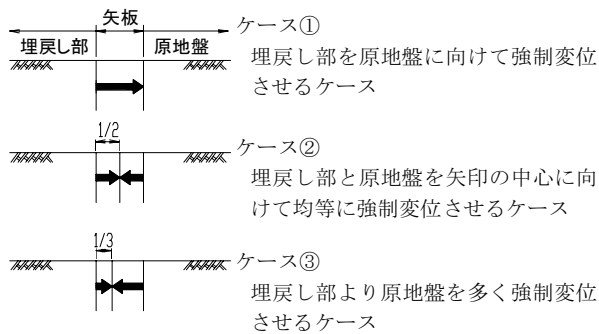


図-4 矢板引抜き跡への周辺地盤の強制変位イメージ

4. 結果および考察

(1) 管体の沈下、変形挙動

原位置観測による管体沈下量と地下水水位の実測値の推移を図-5 に示す。a 区間は矢板引抜き直後から引抜き後24ヶ月経過時まで、b 区間は矢板引抜き直後から引抜き後11ヶ月経過時までの結果である。なお、管体沈下量は管体を基床の上に据え付けた段階を初期値とし、管底部における測定値を示している。

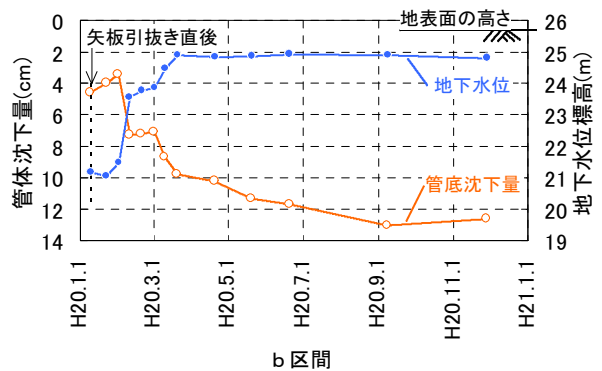
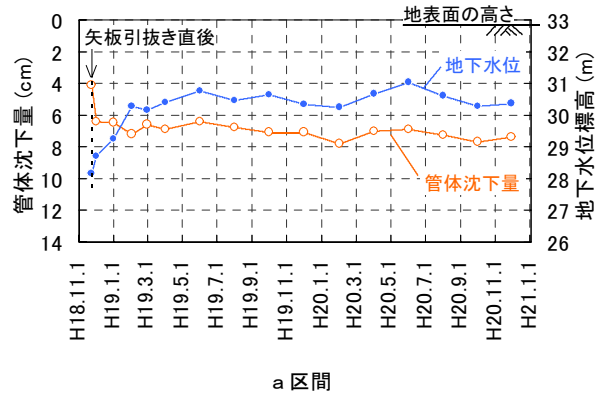


図-5 管体沈下量と地下水水位(実測結果)

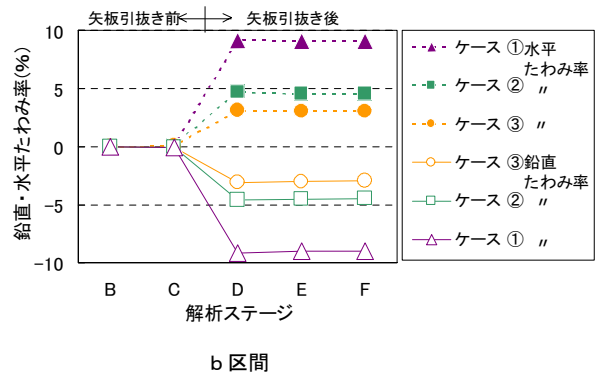
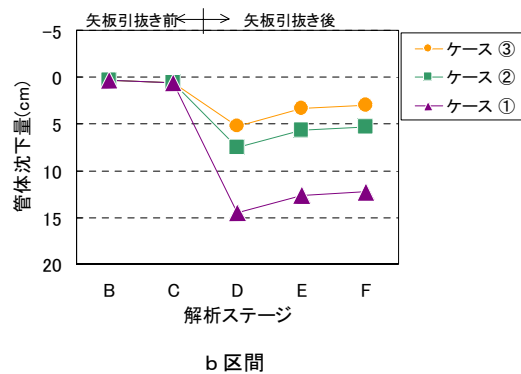
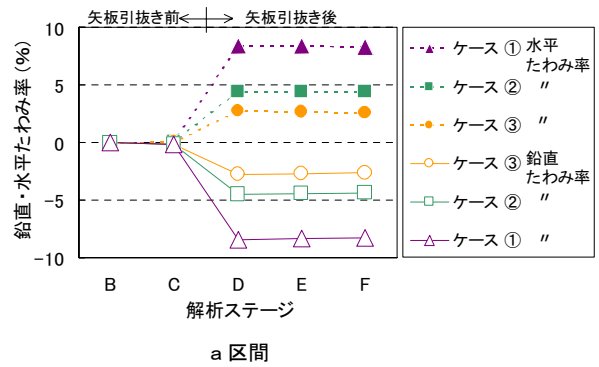
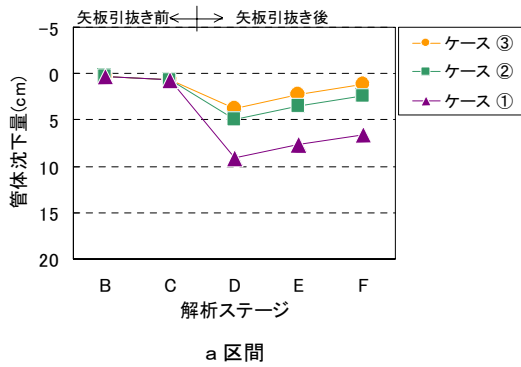


図-6 管体の沈下量(解析結果)

図-7 管体のたわみ率(解析結果)

地下水位は、両区間ともに施工中は水替えにより原地盤掘削面付近まで低下したが、施工完了に伴う水替え停止後には徐々に回復した。

管体沈下量は、いずれも矢板引抜き直後に大きな変位を示し、その後も若干の上下動を伴って徐々に沈下した。平成20年11月28日の最終観測時における沈下量はa区間は7.4cm、b区間は12.6cmであった。

図-6 にFEM解析で求めた各解析ステージの管体沈下量を示す。ここでのケース①～③は図-4 の3つのケースに対応する。横軸は表-2、図-3 で示した施工段階および地下水位変動を考慮した解析ステージである。

解析結果は、a、b区間で沈下量は異なるものの、両区間とも矢板引抜き前の沈下量は小さいが引抜き後には大きくなるという、矢板引抜き前後の挙動は実測と同様の傾向を示した。解析ステージBからFの沈下量の推移に着目すると、矢板引抜き前のステージB(管体、管基礎材施工後)とステージC(地表面までの埋戻し完了後)では沈下量は小さいが、矢板引抜き後のステージD(矢板引抜き直後)では大きく増加した。その後の地下水位を上昇させたステージE(地下水位が常時まで回復)とステージF(地下水位が地表面まで上昇)では、水位の上昇に伴い管体は浮上し沈下量が減少した。これは、地下水位の上昇に

伴い管体と管周辺地盤に浮力が生じ、管体への上載荷重が軽減されたためと考えられる。

つぎに、矢板引抜き後のステージDとEについて、管体沈下量を実測値と解析値で比較する。ステージDに相当する実測値を、地下水位がほぼ常時水位まで回復する前の最大沈下量とする。図-5 から常時水位まで回復した時点、a区間は平成19年2月1日、b区間は平成20年3月20日とすると、それ以前の最大沈下量は6.5cmと8.7cmである。これを図-6 のステージDの解析結果と比較すると、a、b区間ともケース②に近い値になる。

ステージEに対応する管体沈下量の実測値を、図-5 から地下水位がステージEの設定水位と同程度で沈下が収束傾向にある時期の値とする。a区間は、平成20年8月1日の7.3cm、b区間は平成20年11月28日の12.6cmになる。これらを図-6 のステージEの解析結果と比較すると、両区間ともケース①に近い値となる。ただし原位置観測結果から、地下水位が常時まで回復した後も、その変動や時間経過により沈下量が変動しているため、ステージEに対応する実測値については今後の観測結果を含めて評価する必要があると考えられる。

図-7 に、FEM解析の各ケースにおけるステージごとの管の横断面の鉛直・水平方向のたわみ率を示

す。同図では、鉛直たわみ率が負の値を示し、かつ水平たわみ率が正の値を示すとき、管は横長の楕円形に変形したことをあらわしている。a、b区間のいずれも矢板引抜き前のステージBとCではほとんど変形せずたわみ率は小さいが、引抜き後のステージDでは大きく変形し、たわみ率が増加するという同様の傾向を示した。矢板引抜き後に地下水位を上昇させたステージEとFではたわみ率の変化はあまりみられない。

①～③の各ケースを比較すると、沈下量と同様に埋戻し部の強制変位量が大きいほどたわみ率が大きくなった。また、a、b区間のたわみ率が同程度を示しているが、これは埋戻し部の地盤を矢板引抜き跡に強制変位させたことが影響しているものと考えられる。

このように、a、b区間ともに埋戻し部の強制変位量が大きいケースで沈下やたわみが大きくあらわれており、管体の沈下量や変形量の大小には矢板引抜き後の埋戻し部の側方変位量が影響を及ぼすことが示唆された。

実際の管の横断面のたわみは、b区間において管布設直後から埋戻し完了後約4週間まで、経時的に観測を行った。矢板の引抜き前にはたわみの発生はわずかであったが、引抜きによって約2%のたわみを有する横長の楕円形に変形した。

解析結果のたわみは実測値より全体的に大きい傾向はとらえている。

## (2) 管周辺地盤の鉛直変位挙動

管周辺地盤に生じる鉛直方向の変位量の解析結果(ステージE: 矢板引抜き後の常時水位時を想定)と実測値(最終観測時の平成20年11月28日の値、常時水位時)を図-8に示す。図-8では、両区間とも左図は矢板内側の管側埋戻し部における地盤変位量を示しており、右図はa区間は矢板打設ラインから6m、b区間は5m離れた位置の原地盤における地盤変位量である。

a、b区間の埋戻し部および原地盤ともに地表面から深くになるにつれて変位量が小さくなるという実際の傾向はとらえている。また、ケース①～③を比較すると、それぞれの地盤の強制変位量が大きいケースがより大きく変位した。

両区間の埋戻し部の結果について比較すると、a区間ではケース②の解析値と実測値の対応が良好であり、一方、b区間ではケース①～③のどのケースにおいても解析値は実測値より大きくなったが、その中ではケース③が比較的近い値を示した。

今回の解析では、矢板引抜き跡の空隙部に周辺地盤を水平変位させる手法を用いており、地盤変位量

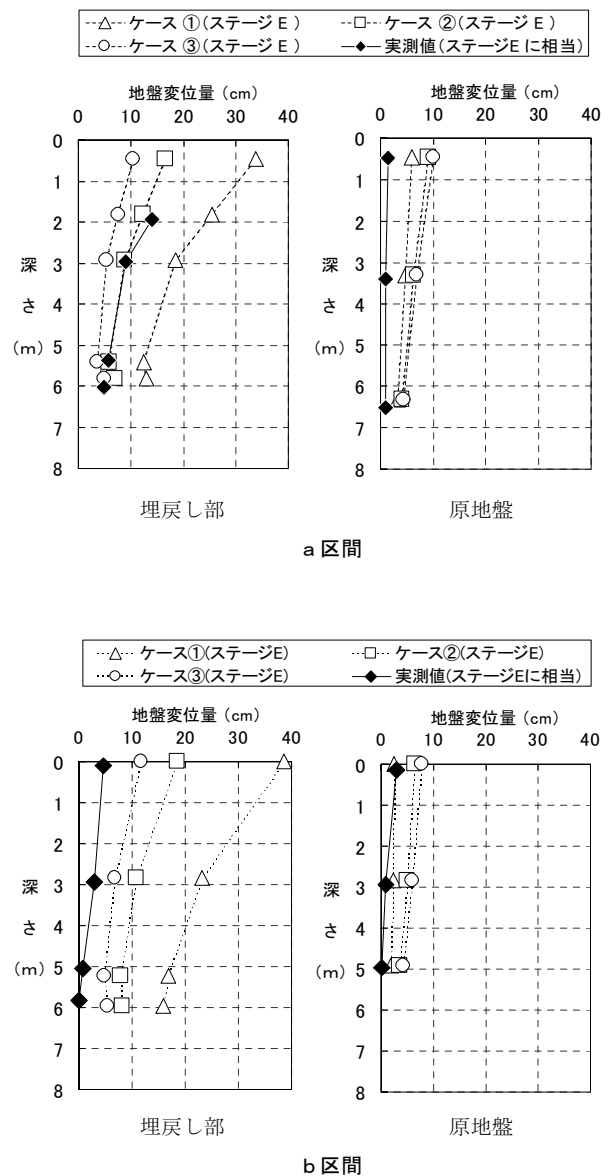


図-8 管周辺地盤の鉛直変位量(解析結果と実測値)

の解析結果には地盤の物性値の設定とともに引抜き後の空隙部への埋戻し部と原地盤の変位量の影響を受けるものと考えられる。なお、原位置観測では周辺地盤の水平変位についての測定は行っていないため、引抜き跡への水平変位量の実測値は不明である。

今回解析対象とした2箇所の区間の地盤条件を比べると、b区間の原地盤はより多層であり、このような多層な軟弱地盤における原地盤の物性値や引抜き跡への変位量の設定方法は今後の課題である。

## 5. まとめ

矢板引抜きによって生じた管体と周辺地盤の挙動を2箇所の原位置で測定するとともに、FEM解析により管内空虚時の管体挙動等を検討した。今回の解析

では、矢板引抜き跡の空隙部に埋戻し部や原地盤の側方変位が生じると仮定した解析手法を採用した。主な結果は、次のとおりである。

- 1) 各解析ケースとも管体の沈下やたわみは観測結果と同様の傾向を示した。それゆえ、今回用いた解析手法で矢板引抜き後の管体の基本的な挙動を把握することが可能である。
- 2) 管体沈下量を各解析ケースの解析結果と実測値で比較すると、a、b区間ともに矢板引抜き直後はケース②が比較的良好に対応し、引抜き後に地下水位が常時まで回復した段階ではケース①が比較的良好に対応した。
- 3) 埋戻し部の地盤変位量は、a区間ではケース②の解析結果が実測値と対応し、より多層なb区間ではいずれのケースも解析結果が実測値を上回った。このような多層の軟弱地盤を対象とした解析では、埋戻し部の地盤変位量が大きく求まる傾向にあった。

## 6. おわりに

本論では、軟弱地盤の大口径管の施工に採用例が

多い矢板施工箇所を解析にとりあげた。今後は、他条件下での原位置観測結果と解析結果を比較検討し、解析精度の向上を図り管水路のより経済的な施工断面を検討する予定である。

**謝辞：**管水路の原位置観測等においては、室蘭開発建設部の関係各位ならびに施工企業体の御協力を頂戴している。末筆ながら、関係者の皆様に対して深甚なる謝意を表する。

## 参考文献

- 1) 六車秀一・竹矢俊一・小野寺康浩：大口径パイプラインの動態観測について－矢板施工における沈下挙動－、第51回(平成19年度)北海道開発局技術研究発表会、技術一般17。(2008)
- 2) 狩野誠二・前川真也・川辺明子：大口径パイプラインの動態観測－沈下挙動の施工方法による比較－、第52回(平成20年度)北海道開発局技術研究発表会、技術一般。(2009)、投稿中
- 3) 吉村洋・東田淳・米谷彰司：たわみ性埋設管の遠心模型挙動に対するFEM弾性解析(矢板施工溝型の場合)、土木学会第52回年次学術講演会、pp. 338-339。(1997)