

泥炭性軟弱地域等におけるパイプラインの更新技術に関する研究

国立研究開発法人 土木研究所 寒地土木研究所 水利基盤チーム ○南雲 人
寺田 健司
大久保 天

泥炭性軟弱地盤に埋設された農業用パイプラインは、経年的に沈下が進行し、管継手部の離脱や管体の破損に至る場合がある。本研究の目的は、泥炭地盤におけるパイプライン事故を防止する方策を提示することである。そのため、本研究では、沈下の実態と発生原因を検討した。その結果、沈下には地下水位が関係していることが示唆された。この成果を受け、パイプラインの維持管理、改修や更新時の設計・施工における留意点を挙げた。

キーワード：パイプライン、泥炭、沈下

1. はじめに

北海道では、全農地の約1割にあたる100千haが泥炭地である¹⁾。とくに石狩平野では、低平地に広く分布する泥炭地を土地改良して大規模な農業が展開されている。しかし、泥炭は間隙比が非常に大きな土壌²⁾であるため、排水や上載荷重の増加によって圧密を受けて地盤を沈下させる³⁾。その地盤沈下に伴い、管体には局所的な応力集中が生じて、管継手部の離脱や管体の割れによる漏水事故が発生する。

そこで、本研究は、泥炭地盤に埋設するパイプラインの更新時における設計・施工上の留意点を明らかにすることを目的とする。泥炭地盤における不同沈下が発生する要因として、上載荷重の増加、地下水位の低下、泥炭層厚や土質の差異などが考えられる。こうした視点から、本研究は現地観測を中心にパイプラインの不同沈下の実態と発生原因を明らかにして、更新時において着目すべき留意点を提示する。

2. 泥炭地におけるパイプラインの長期的な沈下

(1) 本章の概要

本章では、泥炭地に埋設された農業用パイプラインの長期的な沈下挙動の調査結果について述べる。筆者らは、施工後約20年を経過したパイプラインを対象に、その幹線水路全域の標高測量を実施した。また、同調査対象の一部区間におけるボーリングおよ

び土質試験結果から既存の沈下推定式による沈下量を算出し、その計算値と実測値との整合性を検証した。

(2) 調査対象の概要

本研究では、調査対象を北海道石狩平野の泥炭地帯に施工されたパイプライン5路線（A幹線～E幹線、以下、「Sパイプライン」）とした。Sパイプラインの口径は1350～2400 mm、管種は主にFRPM管である。いずれの路線も施工後約20年が経過している。Sパイ

表-1 調査対象のパイプラインの概要

名称	施工年度	口径 (mm)	測量点数
A 幹線	H11 ~ H12	1650 ~ 2200	10
B 幹線	H7 ~ H12	1500 ~ 1800	7
C 幹線	H5 ~ H13	1350 ~ 2000	8
D 幹線	H2 ~ H12	1650 ~ 2000	8
E 幹線	H7 ~ H13	1800 ~ 2400	9

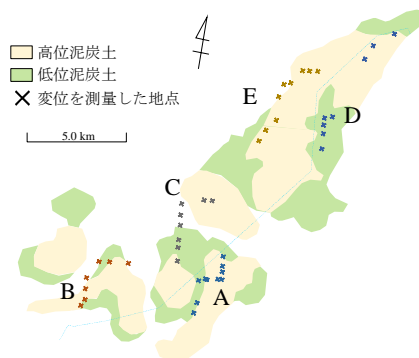


図-1 調査地点と泥炭土の分布 (石狩川水系土壌図⁴⁾を参考に作成)

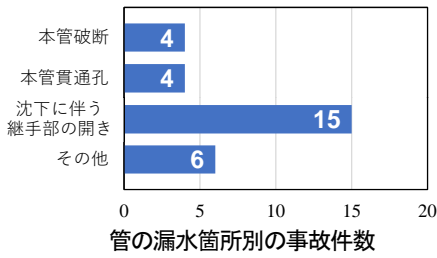


図-2 パイプラインの事故件数

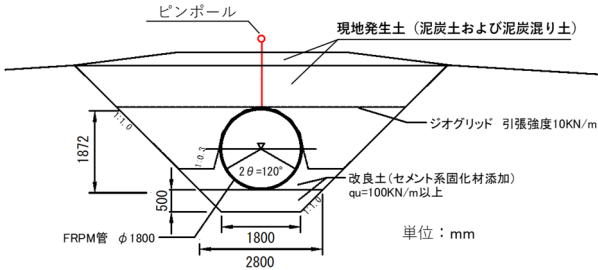


図-3 A幹線の標準断面図

パイプラインの概要と調査地点と泥炭土の分布を、それぞれ表-1および図-1に示す。

(3) 過去の事故件数

Sパイプラインを管理するS土地改良区の2008～2016年の記録から分類・集計したパイプラインの事故件数を図-2に示す。泥炭地に埋設されたパイプラインの事故では、不同沈下に伴う管継手部からの漏水が非常に多い。また、事故の発生箇所としては、道路横断や施設との接続箇所など、管軸方向で荷重条件や支持条件が変化する地点で多く確認される。これらのことから泥炭地盤におけるパイプラインでは、管軸方向の沈下量の把握と推定が重要となる。

(4) パイプラインの沈下量の測量

(a) 沈下量の測量方法

図-3に示すように、地上から管頂まで突き刺したピンポール上端の標高を測量することによって管の中心高を求めた。また、同地点における地表面の標高も併せて測量した。

(b) 広域的調査の結果

図-4に、Sパイプラインの広域的な沈下量測定結果を示す。大半の調査地点では沈下しており、50cm以上沈下した地点も確認された。また、逆に浮上傾向にある地点も確認された。パイプラインは敷設からの経過年数が長いほど変位量は大きくなると想定される。また、管径が大きいほど充水時の荷重増分や空虚時に作用する浮力が大きくなる。これらの影響を簡易的に考慮するため、変位量を管直径と経過年数により除した結果を図-5に示す。

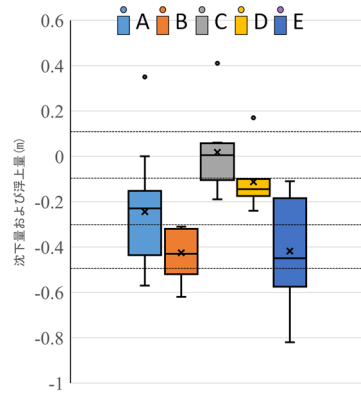


図-4 パイプライン沈下量計測結果

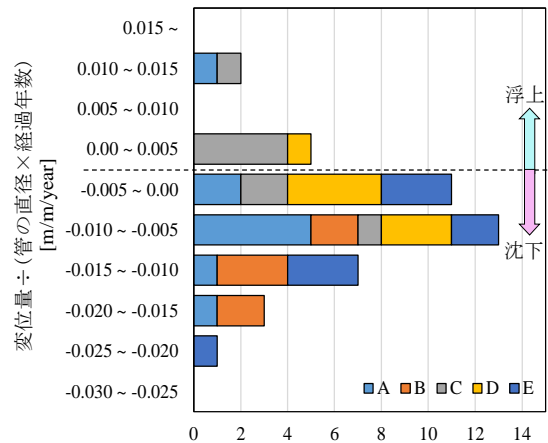
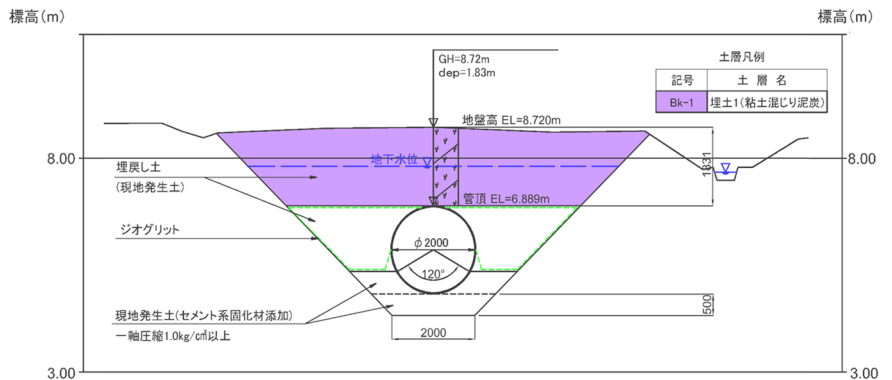


図-5 パイプライン変位量の度数分布 (管直径、経過年数により正規化)

長期間埋設されたパイプラインは、大半が年平均で管径の0.0～1.0%程度の沈下が生じている。一方で年平均2.0%以上沈下しているパイプラインもある。

Sパイプライン周辺の状況を検討すると、地盤の排水が関係していると推察される。例としてE幹線で沈下量が大きい地点の断面図を図-6に示す。パイプラインの直近に排水路が存在しており、他の地点に比べて地下水位はパイプラインに対して相対的に低い標高に位置する。泥炭地では排水により地盤沈下が生じることは広く知られている⁴⁾。このような排水路近傍の区間においては、地下水位の低下に伴いパイプラインの沈下が長期にわたり累積したものと推察さ



E幹線 (約80cm沈下)

図-6 沈下量が比較的大きい箇所断面図

れる。パイプライン沈下の原因としては、他にも道路荷重や周辺圃場の利用形態⁵⁾、泥炭層の分解度・厚さ等が考えられる。沈下はそれらが複合的に作用することが生じていると考えられる。今後、さらに現地調査により精査していく必要がある。

(c) 縦横断測量の結果

パイプラインの沈下量を、より詳細に把握するため、A幹線の一部区間において、図-7に示すように、全長350mの区間を50 m間隔で8箇所、縦断方向および横断方向の水準測量（以下、それぞれ「縦断測量」、

「横断測量」）を実施した。この区間の標準断面図は図-3に示すものと同一である。縦断測量の結果を図-8に示す。測点1550以外の測点では、全体にほぼ一様に沈下している。測点1550は耕作車両などが通過する道路が横断していることから、他の測点に比べて管体の沈下量が大きいと考えられる。すなわち、このような上載荷重が局所的に増大する箇所では、不同沈下が起こり得る。逆に特徴的な状況にない一般区間では、管体は全体的に沈下するものの、必ずしも管体の破損につながる不同沈下を起こすとは限らないものと考えられる。

また、図-8において、パイプラインの沈下は2.0～20.0 cmであるのに対し、地表面の沈下は30.0～85.0 cm程度沈下しており、管体の沈下量よりも管上の地盤層厚が減少していることがわかった。横断測量結果の一例として測点1600地点の結果を図-9に示す。この地点ではパイプラインの建設時に作られた小排水路が存在している。測量の結果、小排水路の標高がほとんど変化していないことから、地下水面が浅にある埋戻し材料（泥炭）が乾燥収縮・分解したことで地表面の沈下および地盤層の消失が生じたと考えられる。このような土被り厚さの減少は、パイプラインの沈下から一転して、浮上による破損につながるおそれがある。

(5) 沈下推定式のパイプラインへの適用

(a) 目的

設計段階においてパイプラインの沈下量予測を困難にする要因として、①地盤条件の不均一性、②配管時の初期状態の不均一性、③沈下推定式自体の精度の問題などが考えられる。現在、沈下予測に利用される推定式は、泥炭地盤上の盛土を対象とするものであり、パイプラインのような構造物にそのまま適用できるとは限らない。そこで、本節では、沈下推定式により算出した沈下量が、実際のパイプラインの沈下量の予測に役立てられるのか、計算値と実測値の比較・検証を行う。

(b) 沈下推定式の概要

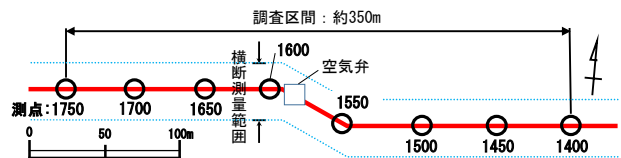


図-7 調査区間の平面および調査位置図 (A幹線)

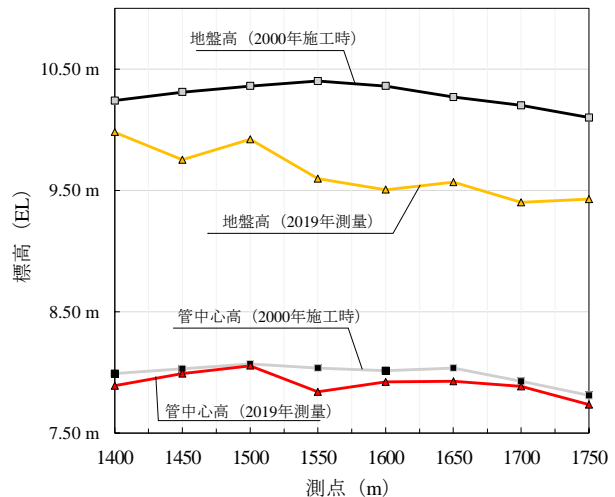


図-8 A幹線の縦断測量の結果

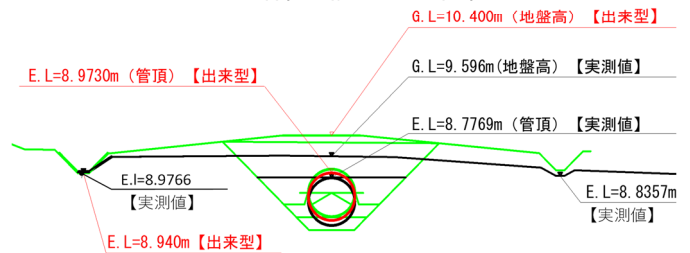


図-9 A幹線の横断測量の結果 (測点1600)

泥炭の沈下量を推定する式として、e-log p法および泥炭式⁶⁾を用いた。e-log p法は、圧密試験で得られるe-log p曲線を用いて、増加荷重から圧密層の沈下量を計算する。また、泥炭式は能登⁷⁾によって提案された経験式であり、含水比200%以上の泥炭地盤に適用される。泥炭の含水比と増加荷重、層厚から簡便に沈下量を計算する方法である。

(c) 調査対象および土質サンプリング

沈下計算対象はA幹線における2地点を対象とした(図-10)。試料を採取し、圧密試験や含水比試験、湿潤密度試験などに供した。サンプリングは図-10に示す通りパイプライン付近(調査孔A, B)と管中心から離隔8.0mの現地盤(調査孔C)で実施した。現地盤から取得したデータを施工前と仮定し、増加荷重を算出した。

(d) 計算結果および考察

パイプライン沈下量の実測値と計算値を表-2に示す。計算値がやや過大となる傾向となった。特に断面1では実測値と計算値とで2.5倍以上の差が生じている。

これは、図-10(a)に示すように断面1付近には杭基礎により支持されている構造物が直近にあることで、沈下の実測値が小さくなったためであると考えられる。断面2については構造物との距離があるため、実測と計算値で約1.5倍程度と図-10(b)に示す断面1と比較して近い値となった。

以上の結果から、既往の沈下推定式は構造物が近傍にない一般区間においては参考値となるが、周辺に異形管や構造物との接続がある場合、推定精度が低下することに留意する必要がある。

3. パイプライン施工直後における沈下量の観測

(1) 本章の概要

泥炭地盤に施工されたパイプラインは、施工直後において大きな沈下量が生じることが経験的に知られている。しかし、その経時的な沈下過程や地盤の圧密分布などは正確に捉えられていない。そこで、本研究では泥炭地盤に建設中のパイプライン直下の地盤に層別沈下計を設置して、パイプライン布設後の管体および地盤の経時的な沈下量の観測を実施した。本観測では、これまでに管の布設直後から埋戻しに至る初期段階で生じた沈下量のデータを取得した。

(2) 観測方法

(a) 観測位置

観測対象としたパイプラインは、北海道の道央南部において建設中のパイプラインであり、泥炭地盤も偏在する。このことから建設工事に際して、管体のほぼ直下に層別沈下計を設置するとともに、その近傍において地下水計を設置して観測を行った。図-11に調査対象とするパイプラインの路線形状と同路線に対する層別沈下計、地下水計の設置位置を示す。この区域には、2019年から2020年にかけて、管径が2000mmと1350mmの2つのパイプライン（DCIP：ダクタイル鋳鉄管）が平行して布設された。層別沈下計は、2019年の工事において両パイプラインの間に設置した（図-12）。また、その翌年2020年には両パイプラインの延長工事が行われた。本章では、2019年実施の工事を「R1工事」、2020年実施の工事を「R2工事」と呼ぶ。

(b) 層別沈下計の概要

本観測では、図-13に示すワイヤ式層別沈下計（PV-300、東横エルメス社製）（以下、「層別沈下計」）を用いた。本層別沈下計は①～④のアンカー部および⑤の変換部から構成され、各深度における地盤沈下量をアンカー部と変換部を結ぶワイヤの伸長により計測する。図-14に計測方法の模式を示す。①のア

ンカーは固定点とする。本観測の目的である各アンカー設置地点の沈下量 $\Delta h_2 \sim \Delta h_5$ は、初期値のワイヤ長

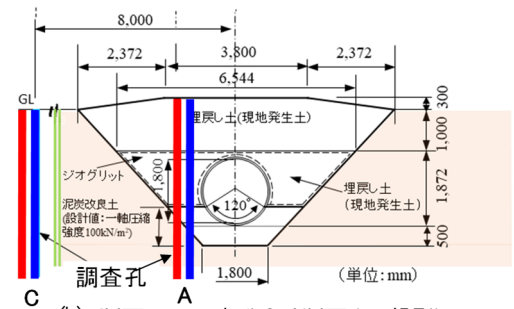
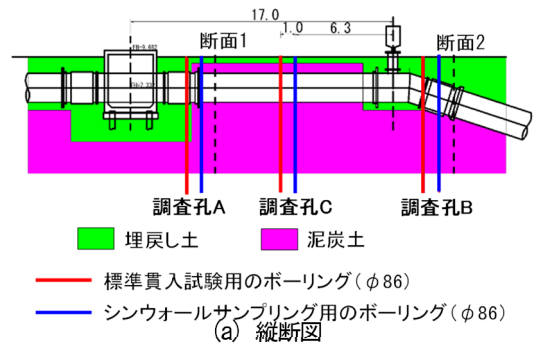


図-10 調査地点の位置および断面図

表-2 沈下量の実測値と計算値

	管種	増加荷重 [kN/m ²]	実測値 [cm]	e-log p [cm]	泥炭式 [cm]
断面1	FRPM	36.3	13.7	34.4	53.6
断面2	鋼製 異形管	71.6	48.6	69.3	70.9

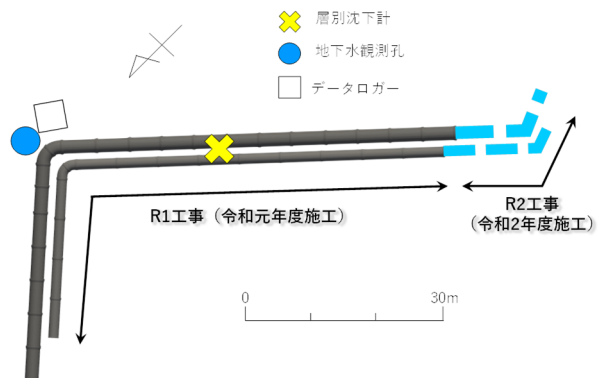


図-11 用水管路、層別沈下計、地下水計の位置



図-12 層別沈下計の設置の様子

$L_1 \sim L_4$ と計測値である沈下後のワイヤ長 $L'_1 \sim L'_4$ を用いて、次の式(1)および式(2)のように算出できる。ただし、 $n=2,3,4$ である。

$$\Delta h_5 = L_1 - L'_1 \quad (1)$$

$$\Delta h_n = \Delta h_5 + L'_n - L_n = L_1 - L'_1 + L'_n - L_n \quad (2)$$

(c) 観測機器の設置状況

観測地点における地盤構成および機器の設置状況を図-15に示す。管体埋戻し部の下部には、泥炭が10m以上堆積している。層別沈下計は、設置地点の地盤をエンジン付きハンドオーガーにより約5m掘削し、層別沈下計のアンカー部を挿入後、ソイルセメントで充填し固定した。アンカー①は地盤沈下を生じない十分な深さと考えられる掘削底部から3.5mの深度地点に設置し、固定点であると仮定した。また、地下水位は、絶対圧水位計を用いて、管水路の近傍において観測した。層別沈下計および地下水位計によって計測したデータはデータロガーにより一括して収録するシステムとした。

(3) 観測結果

地下水位および層別沈下の経時変化を図-16に示す。R1工事における掘削断面内の排水が停止された後、パイプラインの埋め戻しは12/10に完了した。その間11/30より観測を開始した。排水が停止されたことに伴い地下水は急激に上昇した。翌年2020年1月以降の地下水位は緩やかに上昇し、やがて地表から約30cm前後の間を推移した。各層別の沈下は、観測開始から埋戻し完了数日後まで進行した。この沈下は、パイプライン周りの基礎材と埋戻し土の自重による圧密沈下であると考えられる。地盤の深度が浅いほど沈下量は大きく、最上部の変換部⑤

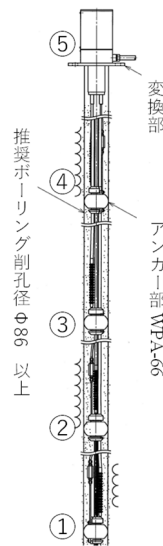


図-13 層別沈下計の外観

で約7cm程度の沈下が確認された。埋戻し完了数日後には、沈下は停止し、その後③④⑤では若干の浮上がみられた。この浮上現象は、地下水位の復元に伴いパイプラインを含む埋め戻しの地盤全体が浮力を受けたためであると考えられる。2019年12月～2020年7月の工事休止期間は、地下水位に際だった変動はなかった。2020年7/28からこうした地下水位の低下にほぼ連動して層別沈下計の計測点の沈下が一斉に進行した。沈下の収束が認められる9月終盤までに最大で約3.5cmの沈下となった。

以上の結果から、地盤沈下と地下水位は連動していることが分かった。層別沈下計の各計測点において沈下がみられることから、パイプラインのみが沈下しているのではなく、この場合は、図-17に示すように、管体と周囲の基礎材、埋め戻し部全体が一体的に沈下していると想定される。これまで、パイプ

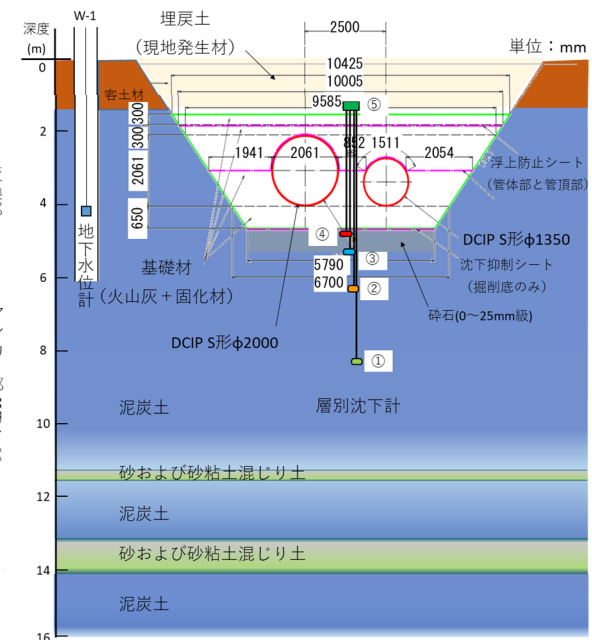


図-15 観測地点における地盤構成および層別沈下計、地下水位計の設置の状況

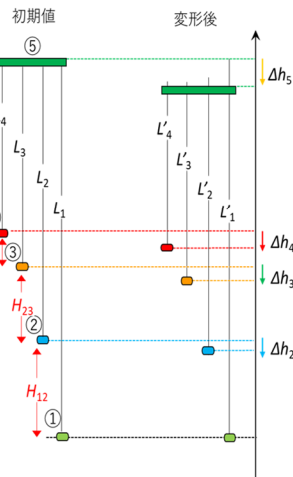


図-14 右：層別沈下計の計測方法の模式

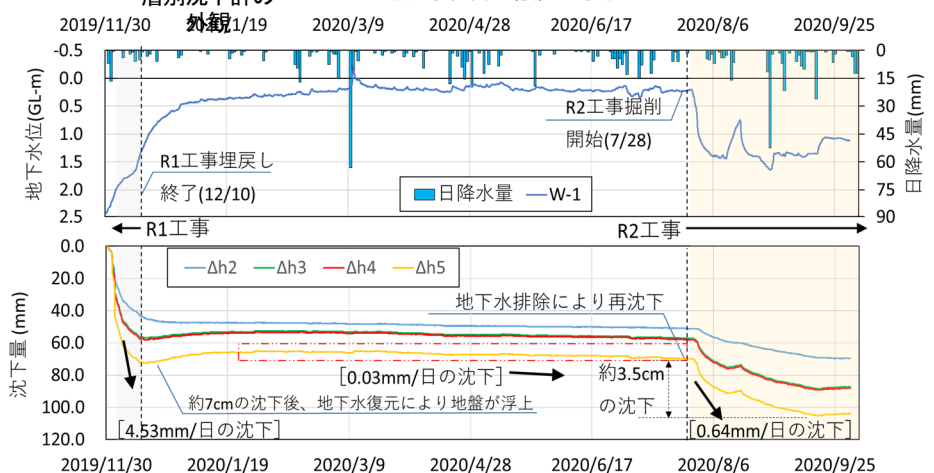


図-16 地下水位および層別沈下の経時変化

ラインの工事中において管体が沈下する現象は、管体の布設や埋戻しによる荷重増加によると考えられてきた。しかし、今回の観測結果によって、農業用管水路の施工直後において、地下水位が管体および地盤の沈下に大きく作用している実態が明らかとなった。

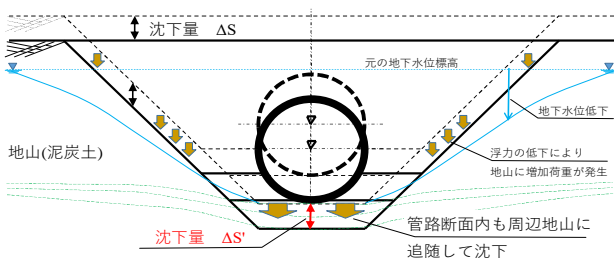


図-17 管水路および地盤沈下の想定

4. まとめ

本研究では、現地観測によってパイプラインの沈下の実態を明らかにして、改修・更新時における留意点を考察した。その結果を次にとりまとめる。

- (1) 泥炭地盤におけるパイプラインの漏水事故は、道路横断部や構造物との接続点などにおける不同沈下によって生じる場合が多い。泥炭地盤におけるパイプラインでは、管軸方向における沈下量の把握と推定が重要である。
- (2) 施工後約20年を経過したパイプラインではほとんどの区間で0~20cm程度の沈下であったが、極所的に50cm以上沈下している箇所もあった。更新事業では、沈下状態を継続観測できる機器を埋設するなどの工夫も必要であると考えられる。
- (3) 沈下量の大きい箇所には排水路が近接していたことから、排水による地下水位の低下に伴いパイプラインの沈下が進行したと考えられる。排水路とパイプライン標高の位置関係を把握しておくことが肝要である。
- (4) パイプラインの不同沈下は、構造物付近や上載荷重がかかる道路横断部など局所的な場所で生じる。それゆえ、特殊な状況にない一般的な区間では、パイプラインは全体的に沈下するものの、必ずしも不同沈下となるとは限らない。現場では、沈下量が相対的に異なると考えられる箇所に着目して、重点的に対策を施すことが適当である。
- (5) 小排水路などにより地下水位が比較的低い箇所では、パイプラインの沈下量よりも地盤付近の沈下が大きい。この状況は地下水位より上位となった土被り部分の泥炭が分解・消失したためと考えられる。この場合、降雨や雪解けによる一時的な地下水位の上昇時に、浮上に転じて管を破損すること

とが考えられる。排水路が近傍にあり、地下水位が低い箇所では、土被り厚の減少に留意する必要がある。

- (6) e-logp法や泥炭式などの沈下推定式による沈下量の計算値は、パイプラインの沈下量予測に参考となるが、異形管や構造物との接続がある場合などは、沈下量の推定精度が低下することに留意する必要がある。
- (7) 泥炭地盤におけるパイプラインの建設工事において、パイプラインは施工直後から沈下が大幅に進行する。その沈下には地下水位の影響が非常に大きい。パイプライン施工時の地下水位の挙動を考慮して工事を進める必要がある。

参考文献

- 1)1) 北海道立総合研究機構（道総研）：北海道立農業試験場資料第37号 北海道土壌区一覽（改訂版）平成20年9月、p.174、2008.
 - 2)渡辺進：泥炭地盤の工学的分類、第11回土質工学研究発表会論文集、pp.81-84、1976.
 - 3)能登繁幸：泥炭地盤工学、技報堂出版(株)、pp.50-51、1991.
 - 4)北海道開発局農業水産部農業計画課：石狩川水系の土壌、1987.
 - 5)梅田安治、矢挽尚貴、井上京：泥炭地の地盤変動と地下水位変動-泥炭地の地盤沈下に関する研究(I)-、農土論集、160、pp.27-33、1992.
 - 6)坂本克史、植屋賢祐：泥炭地における農業用パイプラインの沈下と漏水リスク管理、農業農村工学会誌、89(1)、pp.38-39、2021.
 - 7)国立研究開発法人土木研究所寒地土木研究所：泥炭性軟弱地盤対策工マニュアル、2017.
 - 8)能登繁之：「修正された泥炭地盤の沈下予測式」の簡略化、開発土木研究所月報、460、pp.37-41、1991.
 - 9)南雲人、今泉祐治、寺田健司：施工後19年経過した泥炭地における農業用管水路と周辺地盤の沈下、第63回北海道開発技術研究発表会、2019.
- 国立研究開発法人土木研究所寒地土木研究所：泥炭性軟弱地盤対策工マニュアル、2017.