

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 10 日現在

機関番号：10101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25870007

研究課題名(和文) ライフラインLCC低減への地盤工学的アプローチ：「柔な」複合型地盤改良と長期予測

研究課題名(英文) A geotechnical approach to lifeline LCC reduction: Compliant stabilisation and long-term behaviour

研究代表者

西村 聡 (Nishimura, Satoshi)

北海道大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：70470127

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：泥炭地において地表近くに設けたガス管等の埋設管が長期的に沈下を被り、ひずみ緩和などの維持管理作業に多大なコストが生じている現状を踏まえ、その沈下メカニズムを検証した。実際の管に沿って18年間計測されてきた沈下記録と地盤情報の分析より、実際に泥炭地では沈下量が大きい傾向を確認した。管周囲の埋戻しとして単位体積重量が小さい泥炭の代わりに砂を用いることが沈下の大きな要因と疑われ、長期模型実験・長期三軸試験・弾塑性有限要素解析などを実施して泥炭特有の変形特性を調査し、沈下メカニズムを説明した。また、対策として軽量・低剛性である造粒固化処理土の埋戻し材としての適性について検証し、その有用性が確認された。

研究成果の概要(英文)：Buried pipelines in peat ground have been found to suffer long-term subsidence, necessitating expensive maintenance work. This problem was confirmed by analysing 18-year records of pipeline subsidence and correlating them with peat layers distribution. One of the suspected causes of the subsidence is an effective stress increase due to replacement of light peat by heavier sandy fills around the pipelines. The detailed mechanisms behind the subsidence were studied by performing long-term model tests and elasto-plastic finite element analysis, and were interpreted and explained with the aid of the deformation characteristics of peat established by long-term triaxial tests. As countermeasure, a possibility of adopting granularised stabilised soil as a fill around the pipeline was explored. Its small unit weight and low subgrade stiffness was found to be advantageous in preventing long-term subsidence as well as alleviating forced straining due to any remaining differential settlement.

研究分野：地盤工学

キーワード：泥炭 パイプライン 沈下 長期管理

1. 研究開始当初の背景

札幌などのように市街地に高有機質土が広範に存在する地域においては、地表近くに埋設したガス管などのライフラインが長期沈下を被る事例が報告されていた。管のひずみ緩和のための再掘削・矯正作業などの維持管理作業は多大なライフサイクルコストを伴うものであり、沈下のメカニズムの理解と対策が望まれた。一方で、泥炭に代表される高有機質土の工学的理解は、盛土沈下のように一次元的圧縮が卓越する状況を想定して研究が多く、低拘束圧下で二次元変形（めり込みなど：図1）の寄与が大きい問題に対する知見は極めて限られていた。

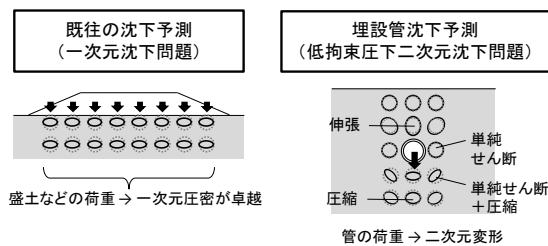


図1 埋設管の沈下

2. 研究の目的

本研究は、高有機質土、特に泥炭層の地表近くの低拘束圧場に埋設されたパイプラインの長期挙動を理解するために、要素としての泥炭の長期圧縮・せん断挙動を研究するとともに、多次元的な境界値問題としての地盤-構造物系の変形メカニズムの解明を目指した。また、変形メカニズムとその原因を理解したうえで、適切な沈下対策と、またある程度の不同沈下がやむを得ない場合の問題軽減策となるパイプライン敷設方法を、地盤工学の側面から提案をすることを目的とした。

3. 研究の方法

本研究は、上記問題の状況を広域的に正しく把握したうえで地盤工学問題へと帰結するため、以下の5つのタスクからなる研究プロジェクトを実施した。

(1) 埋設管実測データと地盤情報の照合

北海道ガス株式会社は札幌市内の泥炭地帯に約17kmにわたり高压ガス幹線を有しており、現在まで18年にわたって約200地点において沈下量を計測している。この沈下量と、地盤工学会北海道支部により編纂された地盤情報データベースを分析することにより得られる泥炭層圧の分布と照合することにより、実際に泥炭層が沈下問題の原因であるか確認を行った。

(2) 重力場長期模型実験による地盤変形メカニズムの理解

泥炭中にパイプライン敷設時の砂質土埋

戻しを行った二次元断面について、低縮尺(1/7)の重力場模型実験を行い(図2)、泥炭地盤が長期的にどのような変形を呈するのか観察を行った。埋戻し砂の重量が問題の本質と考えたため、縮尺に対する相似則を満足するように、水中単位体積重量が砂の約7倍である鉛玉(直径1mm)を砂の代わりに用いた。模型泥炭地盤は、北海道南幌町より採取した泥炭を、加水・均一化した後、原位置含水比まで再圧縮して作製した。地盤の変形はPIVによる画像解析より定量的に記録した。試験は1ケースに約6か月を要し(圧密に関わる実換算スケールで約24.5年)、泥炭層厚が埋戻し深さDの2倍のケースと3倍のケースについて実施した。再現性確認のための予備試験を合わせて計3ケース実施した。

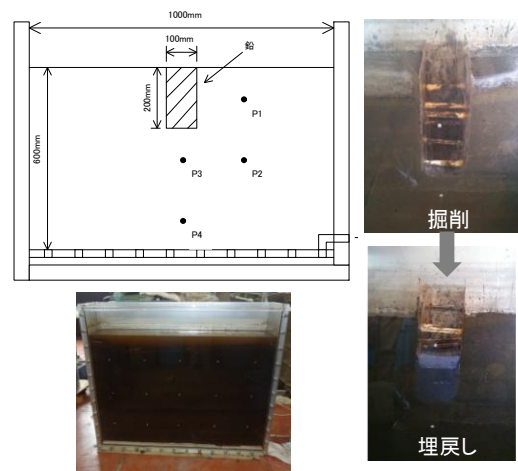


図2 模型実験の概要

(3) 三軸クリープ試験・定ひずみ速度圧密試験による泥炭の二次元変形特性・時間依存変形特性の理解

盛土などの構造物の沈下問題に対しては、一次元圧密試験による土質の圧密特性を評価するのが一般的である。本研究では問題の二次元性に着目し、三軸試験装置を用いて鉛直/水平応力比(K)を一定にした段階載荷試験を行い、泥炭の圧縮・変形特性を評価した。長期間(1ケース3か月程度)にわたる試験であったため、安定して低軸荷重・低拘束圧を維持できるように、死荷重による軸載荷と位置水頭によるセル圧負荷を行うように装置を改変した。また、時間依存性の評価のために定ひずみ速度圧密試験を行った。

(4) 弾塑性有限要素解析による問題の再現

高有機質土における圧密問題は、一次圧密と二次圧密を分離して解釈することが特に困難であることが知られている。本研究では、一次圧密のみを考慮する(つまり非粘性)カムクレイに即した弾塑性構成モデルを用いた有限要素解析を実施して上記の模型実験の再現を行い、パイプラインの長期沈下問題に対して高有機質土の粘性特性がどの程度の重要性を持つのか把握することを目指し

た。解析コードは山添他（2011）によるものを用いた。使用したモデルでは、**図3**に示すように、透水係数 k を間隙比 e の関数とすることにより、圧密係数 C_v が有効応力の増加にしたがって減少していくという高有機質土特有の特徴を再現した。その他、変形係数（体積剛性率 K 、せん断剛性率 G 、ポアソン比 ν ）についても現実に即した定式化を行っている（山添他、2014）。

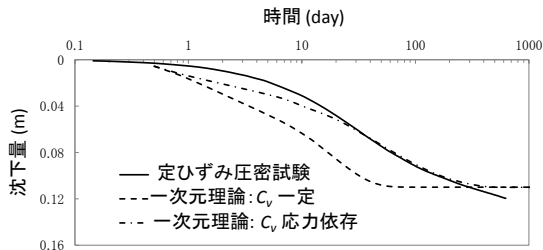


図3 圧密係数 C_v の変化を考慮した構成モデルによる圧密試験結果の再現（実スケールに変換して表示）

(5) 造粒固化処理土を用いた対策の検証

以降に記すように、水中単位体積重量が極めて小さい泥炭を掘削し、砂で管周囲を埋戻すことによる有効応力の増大が沈下の大きな原因であることが疑われた。よって、埋戻しには、施工可能（つまり流動性あるいは粒状性を有する）かつ軽量な材料が望まれる。一方で、泥炭地域は構造物建設によらない広域的な沈下も進行するため、泥炭地域とそれ以外の地域の境界、あるいは河川横断部などの構造的固定端を持つ区間では、ある程度の不同沈下は免れない。そこで、軽量性に加え、管がある程度の鉛直強制変位を受ける場合に、極力小さな反力を及ぼす「柔な」特性を有する埋戻し材が望まれる。そこで着目したのが浚渫土などの高含水比粘土を造粒固化した土質材料である（詳細は早野他、2014を参照）。この材料は比較的軽量であるとともに、低強度の破碎性粒子として作製することが可能である。このような土質の埋戻し材としての適性を、縮尺二次元模型実験（1/10）によって検証した。模型実験では、管を豊浦砂あるいは造粒固化処理土の中に敷設したパイプラインを強制変位させることにより、その反力と地盤変形を観察した（**図4**）。

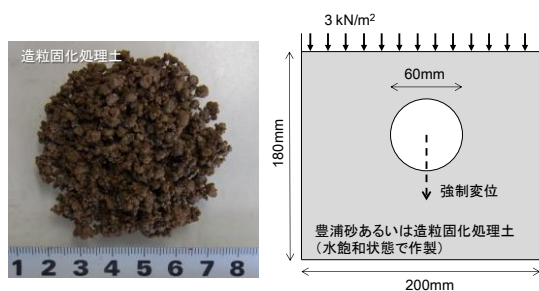


図4 造粒固化処理度とパイプライン強制変位試験の概要

4. 研究成果

(1) 実際の埋設管沈下量と地盤条件の関係

200 地点を超えるガス幹線（直径 600mm、埋設下端深度 1.6m 程度）の 1994 年～2012 年の 18 年間の札幌市およびその近郊での沈下記録をまとめたものが**図5**であり、その空間分布を示したものが**図6**左上である。18 年間の沈下量は最大で 0.8～1.0m 程度に至っていることがわかる。一方、12000 以上のボーリング情報から高有機質土層を抽出してその位置と深度分布を示したものが**図6**右下である。沈下測定地点とボーリング位置の分布が均一に重なっていないため統計処理は困難であったが、高有機質土が地表近くに体積する地域では実際に沈下が大きく測定されていることが示唆された。

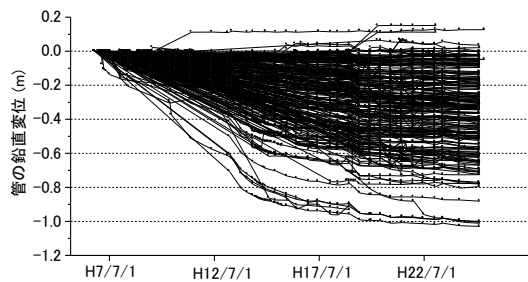


図5 実測された埋設ガス幹線沈下量（元データは北海道ガス株式会社提供）

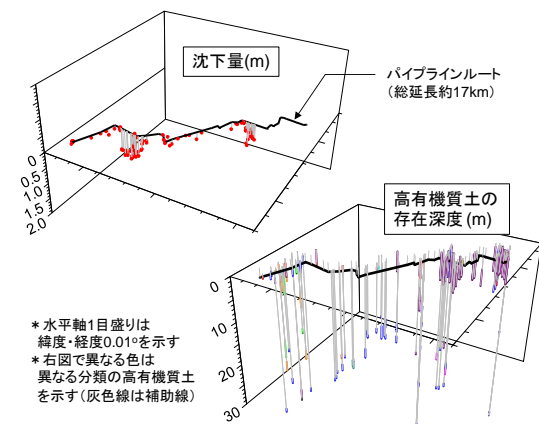


図6 ガス幹線沈下量と高有機質土の分布（札幌市およびその近郊）：

(2) 埋戻しによる長期沈下と地盤変形

上記の実測は固定測量点に対して行われたものであり、地表面に対するものではない。実際に埋設管は道路に沿って敷設されている場合が多く、長年にわたるオーバーレイにより、地表形状の変化は、現在は直接観察することはできない。沈下の要因として以下の三つが疑われた：①泥炭地帯の自然広域沈下、②道路上の活荷重による沈下に付随した沈下、③管埋設時に行う埋戻し砂の自重による沈下、である。高有機質土は一度掘削すると締固めが困難であり、通常は建設発生土として廃棄され、代わりに締固めが容易な砂質土が埋戻し材として用いられる。泥炭の水中単

位体積重量 γ' は典型的には1~数 kN/m^3 と極めて小さく、1.6m分の層厚を $\gamma'=8\text{--}10 \text{ kN/m}^3$ 程度の砂で置き換えることは 15 kN/m^2 相当の有効応力増分を意味し、高有機質土に対しては相当の圧縮をもたらす。このメカニズムを模型実験により検証した。模型実験により観察された沈下量の時間推移を図7に、地盤変形の様子を図8に示す。図7中には、標準圧密試験などによりパラメタを決定した有限要素解析の結果も併記してある。間隙水圧計の記録と数値解析の結果より、約100日後には一次圧密は終了していると推測されるが、沈下はその後も続いており、二次圧密（およびそれに対応するクリープせん断変形）が総沈下量の大きな割合を占めていることがわかる。図9にはひずみ速度圧密試験においてひずみ速度を変えた場合の泥炭試料の圧縮曲線の反応を示している。Isotache的な挙動が示されており、将来的にはIsotacheモデルを上記弾塑性解析に組み込むことで二次圧密まで表現することが可能であると思われる。

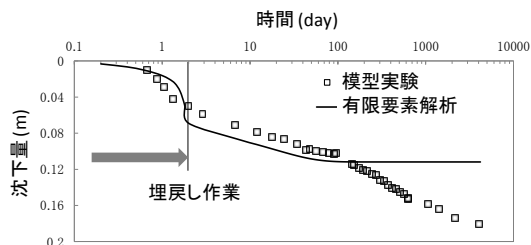


図7 模型実験により観察された埋戻し下端の沈下量（実スケールに換算して表示：地盤層厚が埋戻し深さの3倍のケース）

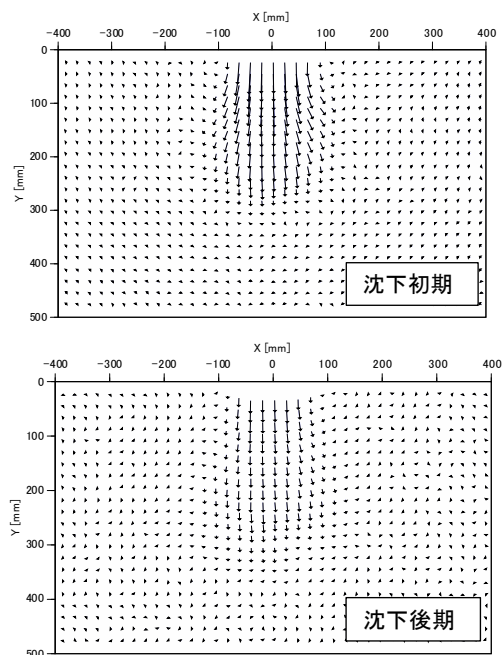


図8 沈下時の周辺地盤変形（ベクトルは5倍に誇張）

図8に示すように、沈下後期においては埋戻し直下での泥炭地盤の側方ならみ出しは

非常に限られており、あたかも埋戻し部の下位の地盤が一次元圧密をうけているかのように見える変形が特徴的である。図10に示した三軸クリープ試験結果によりこの挙動は説明可能である。すなわち、泥炭試料は応力経路に関わらずほぼ側方ひずみを生じていない。一次元変形が起こりやすい特有の固有異方変形特性を有していることがわかる。この変形特性はカムクレイをベースにした今回のモデルでは表現できず、独自の塑性ポテンシャルを考案する必要がある。

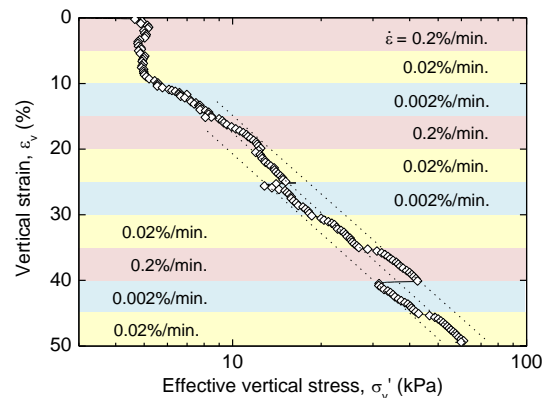


図9 泥炭試料の圧縮特性とひずみ速度依存性

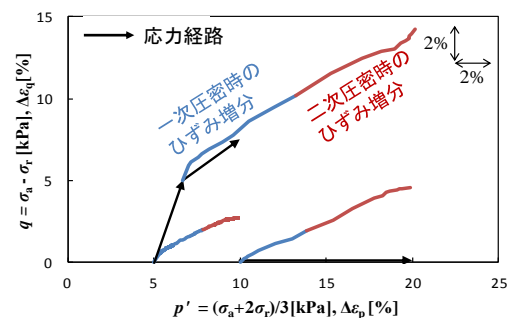


図10 三軸クリープ試験における応力経路とひずみ増分方向

以上の検証から、以下の知見が成果のまとめとして得られた。いわゆる「泥炭式」に見られるように、経験的アプローチでしか捉えられていなかった高有機質土地盤の変形も、ひずみ速度依存性と特有の塑性ポテンシャルさえ把握すれば、二次元的性質まで含めて十分に解析的アプローチによって再現することが可能である。

また、今回模型試験に用いた含水比600%程度の泥炭では、0.2m程度の沈下が観察された。泥炭の圧縮性は含水比にほぼ比例するという既往の知見と、実際の地盤では含水比が1000%程度の層まで存在する事実を合わせると、実測された0.8~1.0mの沈下のうち、0.4m程度は埋戻し荷重によるものであることがわかった。

(3) 造粒固化処理土を用いた対策工の検証

以上の成果より、高有機質土地盤中の埋設管沈下を軽減するためには、水中単位体積重

量が小さく、かつ施工可能（流動性あるいは粒状性を有する）埋戻しを用いることが有効である。一方で、観察された沈下のうちおよそ半分は埋戻し荷重に起因するものではなく、地域（あるいは併走する道路）の沈下に付随するものであると考えられ、その沈下量をゼロにすることは埋設管周辺での対応のみでは不可能であり、ある程度の不同沈下に耐えられる構造物—地盤系構造が必要である。すなわち、埋戻しにある程度のコンプライアンスが望まれることは先述の通りである。そこで管が強制変位を受ける際の地盤反力係数に着目して行った模型試験の結果が図 11 である。比較のため、相対密度 70% の豊浦砂を埋戻しに用いたケースの結果も示している。管の強制変位に対し、造粒固化処理土は砂の約 1/3.5 の反力しか示さず、極めて柔な形で管を受けていることがわかる。

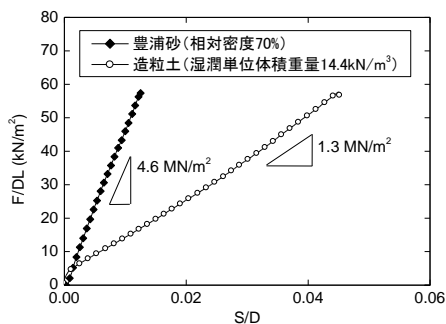


図 11 管の強制変位に対する地盤反力
(D : 管直径、S : 管変位、L : 奥行、F : 抵抗力)

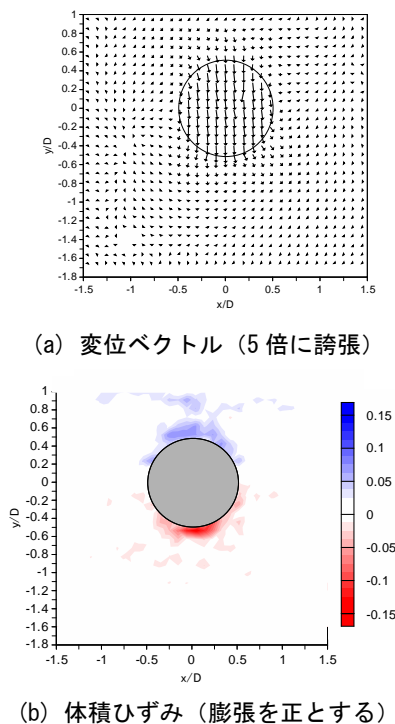


図 12 管の強制変位に対する地盤変形応答

造粒固化処理地盤の変位と体積ひずみを PIV による画像解析から定量化したものが図

12 である。圧縮が管の直下に集中しており、遠距離まで強制変位の影響が届いていないことがわかる。詳細な検証はまだ完了していないが、このように破碎性・低剛性の特性を逆にとり、広域不同地盤沈下が管構造物へのひずみとして伝わりづらい柔な構造の埋設ライフラインシステムを構築可能であることが示された。

<引用文献>

- ①山添誠隆・田中洋行・林宏親・三田地利之、泥炭地盤の圧密沈下挙動と慣用予測式の適用性、地盤工学ジャーナル Vol. 6、No. 3、395-414、2011。
- ②山添誠隆・田中洋行・西村 聡・林 宏親、周辺地盤に生じる変形の予測精度向上を目指した泥炭性軟弱地盤に対する構成モデルの提案と実地盤への適用、地盤工学ジャーナル Vol. 9、No. 3、427-442、2014。
- ③ほぐしを利用した液状泥土の新しい造粒方法の基礎的検討、土木学会論文集 C、Vol. 70、No. 4、424-432、2014。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

- ①山添誠隆・田中洋行・西村 聡・林 宏親、周辺地盤に生じる変形の予測精度向上を目指した泥炭性軟弱地盤に対する構成モデルの提案と実地盤への適用、地盤工学ジャーナル、査読有、Vol. 9、No. 3、427-442、2014。

〔学会発表〕(計 6 件)

- ①Miki, T., Nishimura, S. and Yamazoe, N., Mechanism of two-dimensional long-term subsidence in surface peat layer, 6th Japan-China Geotechnical Symposium, 査読有, Accepted, 北海道科学大学 (札幌市)、2015 年 9 月 1 日発表予定
- ②三木拓也・西村 聡・山添誠隆、泥炭地盤表層における二次元長期沈下挙動に関する模型実験と有限要素数値解析、第 50 回地盤工学研究発表会、査読無、北海道科学大学 (札幌市)、2015 年 9 月 2 日発表予定
- ③三木拓也・西村 聡、泥炭地盤における管状構造物の長期沈下挙動解明に向けた二次元模型実験、第 49 回地盤工学研究発表会、査読無、北九州国際会議場 (北九州市)、815-816、2014 年 7 月 15 日発表
- ④西村 聡・三木拓也、泥炭地盤中の管状構造物の長期沈下に関する模型実験、第 54 回地盤工学会北海道支部技術報告会、査読無、寒地土木研究所 (札幌市)、189-194、2014 年 1 月 31 日発表
- ⑤杉山洋平・西村 聡、高有機質固化処理土の剛性とその非線形性および応力依存性、第 54 回地盤工学会北海道支部技術報告会、査読無、寒地土木研究所 (札幌市)、19-26、2014 年 1 月 30 日発表

⑥杉山洋平・西村 聡、セメント改良高有機質土の動的変形特性、第 48 回地盤工学研究発表会、査読無、富山国際会議場（富山市）、815-816、2013 年 7 月 23 日発表

6. 研究組織

(1) 研究代表者

西村 聡 (NISHIMURA, Satoshi)

北海道大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：70470127