

沈下を受けた埋設管路の高さ調整による応力解放方法について

Stress releasing of buried pipeline subject to ground settlement

東京ガス㈱ ○正員 飯村正一 (Shoichi Iimura)

1. はじめに

輸送パイプラインのような重要管路の沈下のおそれのあるところには、地盤沈下による影響を管理する目的で、図-1 に示すような沈下棒が建設時に取り付けられる。定期的に水準測量を行い、沈下量から管路変形を把握し弾性床土の梁理論¹⁾などに基づき管路の応力が評価される。このようにして評価された応力が管理値を超えた場合には、スポット的に管路を露出させ、磁気異方性センサ²⁾などを用い応力が確認され、基準値を超えている場合には、応力を低減させるための措置（以下、応力解放と呼ぶ）が取られることとなる。

応力解放の方法としては、管路が置かれている状況によって、切断取替え、サポート高さ調整、土圧を取り除き沈下した部分を吊り上げ均した状態で埋め戻す、などの方法が費用対効果などを考慮して適宜選択される。

本論文では、前述の最後にあげるの応力解放方法を実施するにあたっての解析方法についての研究結果を示すものである。

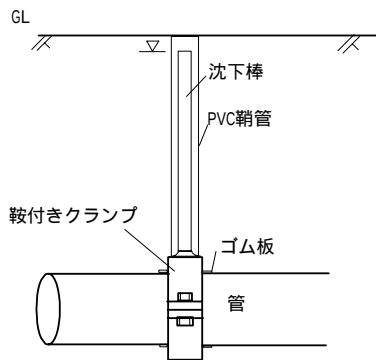


図-1 沈下棒

2. 沈下量から埋設管路の応力を評価する方法

埋設管が沈下を受けたときの挙動は、地盤と管とがばねで接続されているとした図-2 に示すようなモデルで表現できる。ただし、 k は地盤バネ係数、 y_g は地盤の沈下量、 y_p は管路の鉛直方向変位、 M は曲げモーメント、 Q はせん断力である。図より、管軸直角方向の力のつり合いは、

$$Q - (Q + dQ) - k(y_g - y_p)dx = 0 \quad (1.1)$$

$$\therefore -dQ - k(y_g - y_p)dx = 0 \quad (1.2)$$

である。式(1)は結局

$$EI \frac{d^4 y_p}{dx^4} + k(y_p - y_g) = 0 \quad (2)$$

と導かれる。ここで地盤バネ k は、隣のばねとは影響を及ぼし合わないという Winkler (1867) 型のばねを考える。

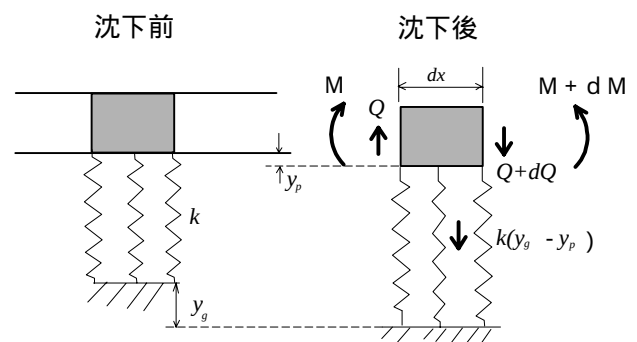


図-2 沈下のモデル化

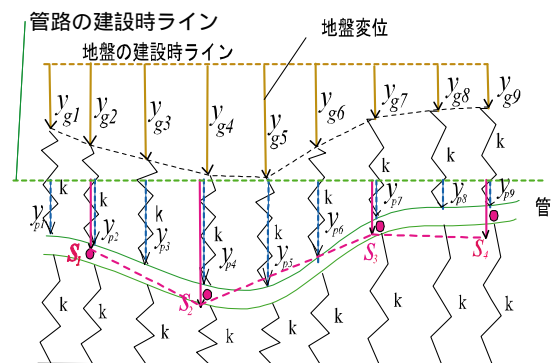


図-3 埋設管の地盤沈下に対する応力解析モデル

図-2 を FEM 解析モデルで示すと、図-3 のように模式化される。図-3 において、管路の沈下測定値を S_i とする。 S_i 間を直線で補間した沈下量分布を、図-3 における地盤変位 y_{gi} の初期値として入力する。その結果、FEM 解析により計算された管路の変位（破線の矢印）が y_{pi} であるとする。ここで、管路の沈下測定値（破線の矢印の側に示された実線の矢印） S_1, S_2, S_3, S_4 と解析から得られた管路の変位量 $y_{p2}, y_{p4}, y_{p7}, y_{p9}$ とをそれぞれ比較し、乖離が大きい場合にはその位置および前後の地盤変位量 y_{gi} の値を変え、もう一度解析を実施する。その結果得られた y_{pi} と S_i を比較し、乖離がある箇所

付近の y_{gi} の値を変え、再度解析を実施する。このような手順を繰り返し、 S_i と y_{pi} (S_i に対応する位置の y_{pi}) の差が許容以内に入った段階で、そのときの y_{pi} から計算される応力が測定されている管路の沈下量 S_i に対応する管路の応力となる。

以上が、埋設管路の沈下量から FEM を用いて応力を算定する方法である。FEM を用いずに、3 点ないし 4 点のみの沈下データから FEM に匹敵する精度で応力算定が可能な簡易式も筆者によって提案されており³⁾、膨大な沈下測定点データから、問題となりそうな箇所を抽出するための一次評価手法として実用化されている。

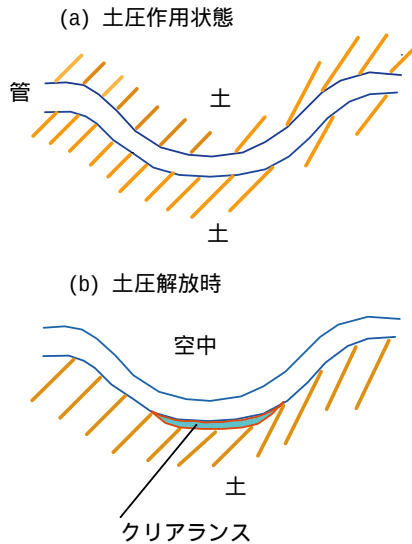


図-4 土圧解放による管の変形

3. 凸凹地盤上の管の応力

3.1 土圧を除去した状態の解析方法

地盤沈下が生じた状態（図-4(a)）で管路上の土を取り除くと、管路は土圧による拘束から解放され、沈下によって発生していた曲げ応力が低減する方向に変位する（跳ね上がる）ものの、管には自重があるために、地盤の凹凸状態がなだらかな場合には、管路の線形も地盤の凹凸に沿った変形を保つ。しかし、大きな沈下応力が発生していた箇所では、局部的に管路が地盤面から浮き上がる（図-4(b)の水色の部分）部分が発生することが考えられる。

図-4(a)に示す状態での応力は、図-3 に示す要領で算定することができる。しかしながら、土圧を解放した(b)の状態の応力算定にこの方法を適用することは適当ではない。管路の変形は(a)、(b)図とも殆んど同じであっても、管路上側の土圧の有無によって局部的な管路の曲率には両者に差があるとみなされるからである。

地盤と管との管軸方向摩擦力を無視し、図-5(a)に示すように、空中から管路を極めてゆっくりとした速度で落下させると、管路は図-4(b)に示されると同じ変形を呈し安定するとみなされる（以下では、この方法を落下安定法と呼ぶ）。

このような挙動の解析モデルは以下のように考えるこ

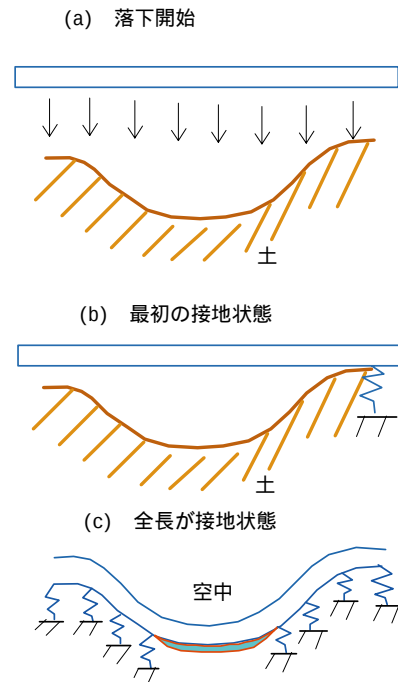


図-5 落下安定法の解析イメージ

とができる。まず 1st ステップでは図-5(b)に示すように地盤面が最も高い箇所において最初に管と地盤が接触することとなるから、この位置に対応する節点に図-3 に示すと同じ地盤バネ係数を有すばねを設定する。2nd ステップでは、更に自重によって落下を進行させ次に接地する節点に同じバネ係数のばねを取り付ける。このようにして、自重によるステップを進行させ、外力の合計が自重荷重に達するまでステップを進めると図-5(c)の状態となる。

図-3 に示す土圧作用時の地盤沈下による応力算定法と、土圧が作用していない状態でほぼ同じ凹凸状態の地盤面上にある管路の応力解析法との違いは、前者では地盤の凹凸量にほぼ比例した地盤バネの伸びが与えられるのに対し、後者の方法では接地した状態ではばねの伸びはゼロであるという点であり、更に後者の方法では、図-5(c)に示すような地盤面との非接触箇所（水色の部分）では地盤バネが無く、空中にあるという点である。

ここでは、地盤バネの設定の方法のみを示したが実際には、地盤バネの非線形性、管材料の非線形性なども同時に判断しながらステップを刻むこととなる。

3.2 解析と実際との比較

3.1 節に示す解析方法の妥当性をみるためにモデル試験を実施した。幅 50mm、板厚 4.5mm、長さ 5000mm の規格寸法を有す矩形断面の鋼製板材を溶接接合し長さ 16540mm としたものを、供試体とした。表-1 に実測の断面寸法、単位体積重量を示す。なお、管断面を有す部材を用いずに矩形断面の部材を用いたのは、管断面の部材に較べて矩形断面の部材であれば試験条件を満足可能な部材の選択が容易（ひずみゲージが貼付可能な面積と直径約 25mm の磁気異方性センサを当てる平滑面が確

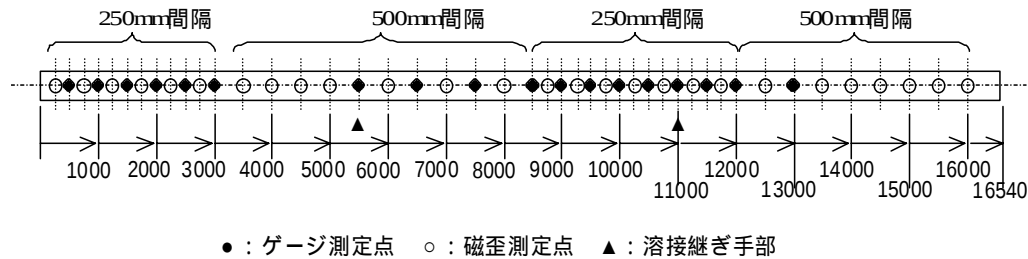


図-6 ひずみ等測定位置

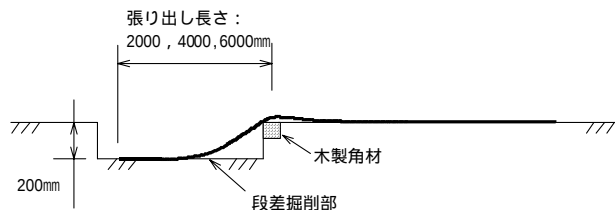


図-7 段差上の部材の応力測定試験

保でき、試験費用の観点から、可能な限り短い延長の試験体であることが望ましい）という理由による。

表-1 試験体の諸元

項目	実測値（規格値）
板厚（mm）	4.36（4.5）
幅（mm）	50.07（50.0）
単位体積重量（kN/m ³ ）	75.33（76.5）

供試体の断面は幅に対して厚みが小さいので、両面で測定しなくても片面での測定で、試験体に発生する曲げ応力をほぼ正確に把握することができる。そこで、試験体に曲げが作用したときの応力分布を、ひずみゲージを用いて測定することとし、ひずみゲージが取り付けられていない位置の応力は磁気異方性センサを用いて測定した。磁気異方性センサによる測定では直交2方向の応力差が測定されることから、ひずみゲージも2軸のものを貼付した。図-6 にひずみゲージおよび磁気異方性センサによる測定位置を示す。ひずみゲージを取り付け後、水平の取れた定盤の上に供試体を直に置き、ひずみゲージおよび磁気異方性センサの初期値を計測した。

図-7 に示すように、シルト混じりの砂質地盤の一部（長さ 200、400、600mm で深さ 200mm、奥行き約 200mm）を掘削し締め固め、段差境界位置に木製角材をセットした状態の地盤上に図-6 に示す供試体をひずみゲージ貼付面を上側にして直に置き、静ひずみ測定器を用いてひずみを測定するとともに、磁気異方性センサによる測定も行った。

図-8(a),(b),(c)に部材長手方向掘削長さ 200、400、600mm の場合についての供試体の応力分布を示す。図において、▲はひずみゲージによる測定値、○は磁気異方性センサによる測定値を示す。段差境界部において応

力がピークを示している。このピーク部前後におけるひずみゲージによる値と磁気異方性センサによる値を掘削長さ 200、600mm の場合について（掘削長さ 400mm のケースではピーク位置での磁気異方性センサの測定は実施されていないため）比較すると、磁気異方性センサによる測定値はひずみゲージによる測定値を補間するような値を示している。

○印を付した実線は、3.1 節で示した解析方法によって求めた応力分布を示す。ピーク位置付近における実測応力と解析値はかなり良い一致を示している。ピークから離れた位置において磁気異方性センサ（○印）の値が解析とはやや乖離が見られるが、その値はせいぜい±10Mpa 程度であり、磁気異方性センサの測定分解能以下の値である。

4. 凸凹地盤上の管の局部吊り上げ時の応力

4.1 吊り上げ時の応力解析方法

凸凹地盤上に置かれた管の局部吊り上げは図-9 に示すように考えることができる。すなわち、吊り上げる位置の地盤面を吊り上げ量だけ高く設定するという方法である。具体的には吊り上げ点まで管が落下した時点において地盤バネ係数よりも大きな（吊り上げワイヤーのばね係数に匹敵する）ばねを設定する。管には剛性があるから吊り上げ点の前後では最終安定時点においても地盤面とは非接触（地盤バネが設定されない状態）となる。結果的に吊り上げたことと同じ状態となる。

この手法を用いると、図-5(c)に示した状態から吊り上げ量に応じて地盤バネを切断していくというステップが不要で、図-5 に示したと同じ流れで解析することが可能である。

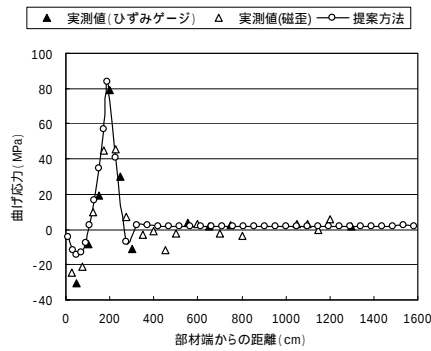
4.2 解析と実際との比較

平らな地盤上に図-6 に示す供試体を置き、中央点を図-10 に示す要領で 20、40、60cm の高さに吊り上げ、ひずみゲージおよび磁気異方性センサによる応力とロードセルによる吊り上げ点反力を測定した。

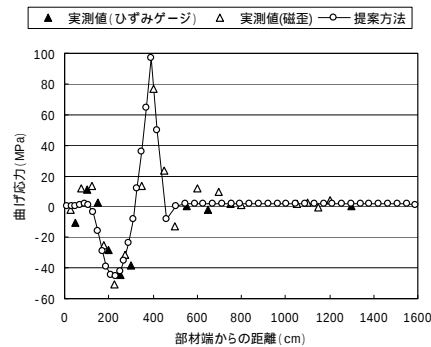
図-11 に 20cm 持ち上げた場合の実測応力と解析による応力との比較を示す。両者はかなり良い一致を示している。

5. おわりに

(a) 掘削長さ: 200cm



(b) 掘削長さ: 400cm



(c) 掘削長さ: 600cm

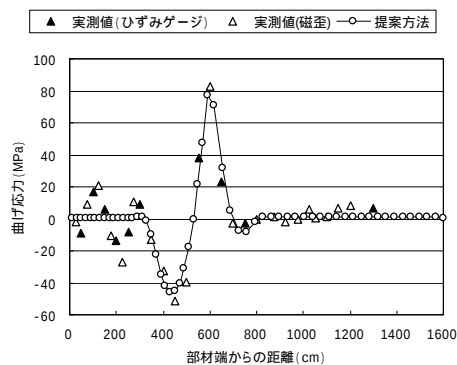


図-8 段差地盤上にある部材の応力の
実験と解析の比較

地盤沈下によって管路に大きな応力が発生した場合に、管路上の土を取り除き、高さを調整した後埋め戻すという応力解放方法を実施する際の管路の応力を評価するための解析方法について検討した。

その結果、筆者が提案する落下安定法は、このような場合の応力算定にかなり有用な方法となる可能性が高いことを1、2のモデル実験結果との比較から示した。

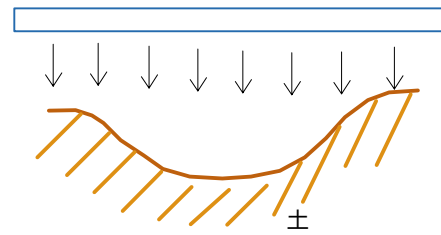
謝辞

本実験の実施に際しては、(株)ジャパンテクノメイトの境 禎明氏に協力をいただきました。記して謝意を表します。

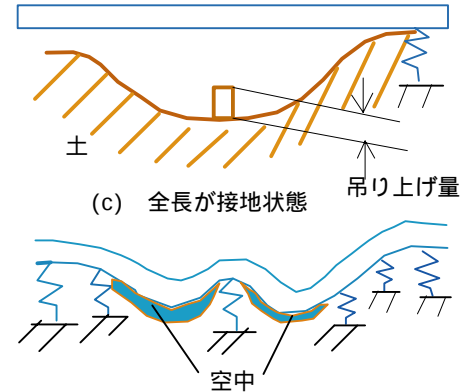
参考文献

- 1) Hetenyi, M. : Beams on Elastic Foundation. Ann Arbor : The University of Michigan Press, 1946.

(a) 落下開始



(b) 最初の接地状態



(c) 全長が接地状態

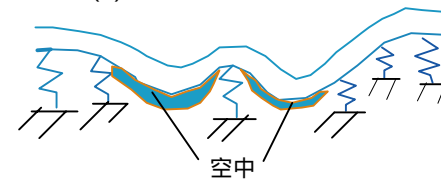


図-9 吊り上げ法の解析イメージ

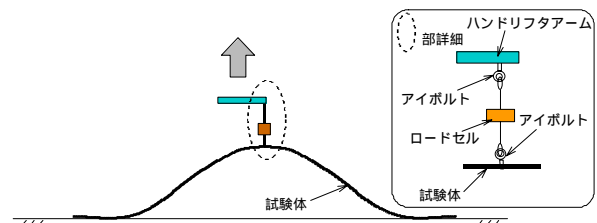


図-10 中央部吊り上げによる応力測定方法

リフト量 $l = 20\text{cm}$

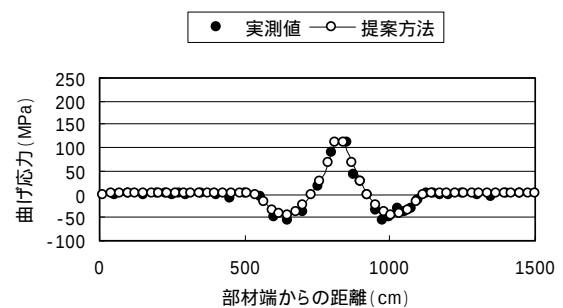


図-11 中央部吊り上げ時の応力の実測と解析との比較

- 2) 境禎明, 卯西裕之: 磁気ひずみ法を利用した鋼管の曲げ応力測定・評価技術, 非破壊検査, 53(12), pp. 767-771, 2004.
- 3) Iimura, S. : Simplified Mechanical Model for Evaluating Stress in Pipeline Subject to Settlement, JCBM, Elsevier, 18(6), pp. 469-479, 2004.