半埋設立体配管系の地盤沈下に対する維持管理用一次評価式

Simplified mechanical model for the preliminary evaluation of a piping system in station subject to ground settlement

(株キャプティ ○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、 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、弾性床上の梁理論 など¹⁾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、非破壊的に応力が測定され^{2)~11}、 基準値を超えている場合には、切断、ライナー調整、土 圧を撤去しての高さ調整などの応力を低減させるための 措置(以下、応力解放工事と呼ぶ)が講じられることと なる。切断を行わずに沈下した部分を吊り上げて高さを 調整した後に埋め戻す、という応力解放工事を支援する ための応力評価簡易法も著者らによって提案¹²されて いる。

輸送パイプラインは、上流の工場から圧力調整や分岐 などの目的で設置される基地(以下ステーションと呼 ぶ)までを結ぶ配管とステーション内配管とに構造的に は区分される。前者は道路下に敷設され、同一口径、同 一圧力で、障害物を避けるなどの目的での曲管部は多数 含まれるものの、基本的に分岐部は無い。後者は口径変 化や圧力変化が随所に有るとともに、曲管部や分岐部が 多数含まれる複雑な配管構造となる。道路下などに埋設 されているパイプラインに取り付けられている沈下棒の 数は、有に 10000 ポイントを超えていることから、冒頭 に述べたような応力検討を、全ての点について行う事は、 到底できることではない。まずは問題となりそうな箇所 を抽出し、抽出された箇所について配管形状や土質条件 を考慮した詳細な応力検討(以下詳細検討という)を行 うことが現実的な選択である。そこで、問題箇所抽出の ための一次評価用簡易式(以下一般部用簡易式と呼ぶ) が、著者によって提案され¹³⁾実用に供されている。

この一般部用簡易式は、3点ないし4点の沈下測定値 から中の点の応力を評価するものである。一方、ステー ション内配管は、構造は複雑ではあるものの、配管の一 部分を抽出すれば前記一般部用簡易式を適用することも できないことでは無い。しかし、配管の一部分とは言え、 曲管が複数含まれる立体構造となり、更に埋設部分と露 出部分とが混在することから、一般部用簡易式では安全 すぎる評価値を与える結果となることが多い。これはす なわち、手間のかかる詳細検討の件数を必要以上に発生 させることを意味する。したがって、ステーション内配 管に特化した、一次評価用簡易式が別途必要である。本 報告では、ステーション内配管構造を分析し、地盤沈下 によって最も大きな応力が発生し易い部分に着目して配 管モデルを作成し、そのモデルについて定式化した一次 評価用簡易式を示す。

2. 一般部用簡易式について

一般部用簡易式は、1)埋設部用、2)露出部用、3)埋設 と露出の境界部用の3つから成る。1)、2)は、3 点の沈 下量から中の点の応力を算出する式として、3)は埋設部 で2点の沈下量、露出部のサポート点で2点の沈下量の 計4点の沈下量から、露出部第一サポート点(埋設と露 出の境界部に近い側のサポート)に発生するピーク応力 を算出する式として定式化されている。

図 1(a)に、埋設部において計測された沈下測定値の一例を〇印で示す。この管路は外径 60.96cm、肉厚が 1.27cm である。この沈下測定値から FEM 解析によって 応力を算定する場合の力学モデル ¹²⁾を図 2 に示す。す なわち、kを地盤ばね係数、 W_g を地盤の沈下量、 w_p を管路の鉛直方向変位、 S_i を管路の沈下測定値とし、 $S_i間を直線で補間した沈下量分布を、図 2 における地 盤変位<math>W_{gi}$ の初期値として解析を行い、その結果得られ た管路の変位を W_{pi} とする。ここで、管路の沈下測定値 $S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4$ と管路の変位量 $W_{p2} 、 W_{p4} 、 W_{p7} 、 W_{p9}$ 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 W_{gi} の値を変え、もう一度 解析を実施する。得られた管の変位量 W_{pi} と S_i を比較



-1-



地盤の建設時ライン

図2 埋設管の地盤沈下に対する応力解析モデル¹²⁾



図3 埋設部用簡易式の応力計算モデル

し、乖離がある箇所付近のWgi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、 $S_i \ge W_{pi}$ (S_i に対応する位置のWni)の差が測定スパンの影響、測量 誤差の介在などの可能性を考慮しながら、許容に達した と判断された段階で、そのときのWniから計算される応 力が、測定されている管路の沈下量Sに対応する管路 の応力となる。このような手順で算出された管路の変位 を、図 1(a)の●印付実線で示す。なお、解析に使用した 地盤ばね係数は 9.8N/cm³ である。図 1(b)の●印付実線 は、FEM による応力分布を示す。また図 1(b)の〇印は、 一般部用簡易式の中の埋設部用式¹³⁾によって算出され た応力を示す。この式では、3 点 (a、b、c とする)の 沈下量とスパン(図1(b)における左側のピーク応力値算 出では、図1(a)の〇印で示される沈下測定値より図3に 示すように、a 点の沈下量として-23.1cm、b 点-27.8cm、 c 点-9.9cm と、a-b 間のスパン 20.1m、b-c 間 25.3m を抽 出)から、中の点(b点)の応力を 89.7MPa と算定する ことができる。また、式の精度は図1(b)に示されるよう に、多点(このケースでは7点)を用いた FEM 解析に よって算定される応力に匹敵する。因みにこの程度の精 度が得られると、膨大な数の沈下測定点データからの問



図 4 ステーション配管における沈下による最大 応力発生箇所

題箇所抽出に有効に活用することができる。

3. ステーション配管用簡易式の定式化

ステーション配管において、最も大きな沈下による応 力が発生すると推定される箇所は、図4に示されるよう な埋設部となるメインバルブ配管からの立ち上がり部 (途中からは露出配管となる)曲管においてである。簡 易式は、早期に問題箇所の候補を抽出する目的で用いら れ、簡易式による応力が降伏応力に対して一定の割合に 達すると、配管形状や土質条件を考慮した梁理論に基づ く FEM 解析が実施されることとなる。したがって、ス テーション内配管用簡易式も、既存簡易式と同じ運用が なされることを前提に定式化を行う。なお、既存の簡易 式は、解析条件を同じにすれば、図1に示されるように、 多点を用いた FEM による解析結果とほぼ同等の結果が 得られるように定式化がなされている。ステーション内 配管用簡易式については、評価対象部の配管構造が複雑 であることから、既存式と同等の条件での定式化は容易 ではない。そこで実用的な配管寸法の範囲内において、 配管形状や曲管特性¹⁴⁾を考慮した FEM を用いた解析に よって算出される値を下回らない(安全側の)値が得られ る式の定式化を行うこととする。

3.1 応力計算用配管モデル

メインバルブからの立ち上がり部配管の沈下測定点 (以下測点とする)は、ほとんどの場合にメインバルブ とサポート部に設けられ、この2点間に相対変位が生じ ると、立ち上がり部曲管においては面内曲げによる応力、 水平曲管においては面外曲げによる応力が発生する。サ ポート点においても応力のピークが形成されるが、直管 部であるために、応力係数¹⁴⁾が考慮される曲管部に較 べて、値は小さくなる。最大応力は、結局ほとんどの場 合に、立ち上がり曲管部に発生することとなる。

上記の実態から、提案する簡易式で評価する範囲を、 図 4 の部材 a、b、c が含まれる部分とし、これを図 5 に示すようにモデル化する。すなわち、全て露出配管と



図5 定式化用配管モデル



図6部材bの捩り

する代わりに分岐付け根部を固定とし、サポート部には 6成分の材端力(軸力、せん断力2成分、曲げモーメン ト2成分、捩りモーメント)を作用させた配管モデルで ある。なお、せん断力 P 方向の変位をδ(メインバル ブとサポートの相対沈下量差に対応)とする。

3.2 鉛直方向相対変位と応力との関係の定式化

(1) P による曲げモーメントおよび M₁ によって発生す る鉛直方向変位

鉛直面内に作用する曲げモーメント M_1 と、鉛直方向 に作用するせん断力 Pによる、部材 c の端部における鉛 直方向の変位を δ_1 とし、P および M_1 を δ_1 との関係と してまず求める。このために、P によって発生する曲げ モーメントによって部材 a、b、c に蓄えられる弾性ひず みエネルギーU_Pと曲げモーメント M_1 によって部材 a、 b、c に蓄えられる弾性ひずみエネルギーU_{M1}を求め、 サポート位置において M_1 に対応するたわみ角をゼロと した仮定の基に、カステリアノの定理を適用すると、P と δ_1 の関係、 M_1 と δ_1 の関係は式(1)、(2)のように導か れる。



図7 部材 a の頭の傾き

$$P = \frac{12EI\delta_1(a+b+c)}{c^3(4a+4b+c)}$$
(1)

$$M_{1} = \frac{12EI\delta_{1}(a+b+c)}{c^{2}(4a+4b+c)}$$
(2)

ただし、Eは縦弾性係数(ヤング率)、*I*は断面二 次モーメントを示す。

(2) P による曲げモーメントおよび M₁による部材 c の捩 りによって発生する鉛直方向変位

$$\delta_2 = \frac{32(cP - M_1)}{\pi d_a^4 G} \cdot \frac{cb}{e} \tag{3}$$

ただし、パイプの外径を d_o 、内径を d_i としたときに、eは式(4)である。また、Gは横弾性係数を示す。

$$e = 1 - \frac{d_i^4}{d_a^4} \tag{4}$$

式(3)の P、 M_1 に式(1)、(2)を代入し、 $\delta_2 \delta_1$ で表 すと、

$$\delta_2 = \frac{192bEI}{\pi e d_a^4 G(4a+4b+c)} \delta_1 \tag{5}$$

となる。

(3) M₁ による部材 a の頭の傾きによって発生する鉛直 方向変位

図 7 に示すように、部材 a が曲げモーメント(cP- M_1) によって曲げられると、部材 c も部材 b を介して鉛直方 向の変位として伝達される。この値が部材 c の端部にお いて δ_3 であるとする。ここで、式(1)、(2)より、

$$(cP - M_1) < M_1 \tag{6}$$

であるから、安全を見て (cP- M_l) の代わりに M_l を用 いると、 δ_3 は式(7)となる。

$$\delta_3 = \frac{ac}{EI} M_1 \tag{7}$$

これに、式(2)を代入すると、

$$\delta_3 = \frac{12a(a+b+c'/2)}{c(4a+4b+c)}\delta_1$$
(8)

となる。ここで、鉛直方向変位δは、それぞれの鉛直方 向変位を加算した値、つまり、

$$\delta_1 + \delta_2 + \delta_3 = \delta \tag{9}$$

であると仮定する。 *z*を断面係数とすると、サポート 位置における曲げ応力σは、

$$\sigma = \frac{M_1}{z} = M_1 \frac{d_o}{2I} \tag{10}$$

となることから、曲げ応力σと変位δとの関係は、

$$\sigma = \frac{3EGd_0(2a+2b+c)\delta}{cG(12a^2+12ab+4bc+10ca+c^2)+3bc^2E}$$
(11)

と導かれる。

3.3 提案式と FEM の比較

呼び径 600mm(外径 60.96cm、内径 58.42cm)と呼び 径 300mm(外径 31.85cm、内径 30.17cm)について、提 案式による計算結果と FEM の比較を表 1 に示す。FEM 解析は、本来曲管部となる位置を直管同士の接合とみな したケース1と、曲管として扱ったケース2(応力係数 とたわみ係数を考慮¹⁴)について行った。

表1より提案式は、ケース1とは極めて近い値を示し、 ケース2とは 2~3割安全側の評価を与えることが分か る。ただし、a 寸法については実態から離れた大きな値 を与えると、必ずしも安全側の評価とはならない。

· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	表1	提案式と	FEM	によ	る	曲け	『応力	の比較
---------------------------------------	----	------	-----	----	---	----	-----	-----

		FEM			
計算条件	提案式	ケース1	ケース2		
		直管	曲管		
600A,					
a=b=c=200cm	103 MPa	98 MPa	68 MPa		
$\delta = 1 \text{cm}$					
300A、					
a=b=c=200cm	54 MPa	53 MPa	42 MPa		
$\delta = 1 \text{cm}$					

4. おわりに

実態に即したステーション配管寸法の範囲内において、 FEM による解析結果に較べて安全側の評価が得られる、 言い換えると、従来の3つの簡易式と同様の運用が可能 な、一次評価用簡易式を提案した。また、当該式は、メ インバルブからの立ち上がり部分を対象にしたものであ るが、既往の3種類の式と組み合わせることにより、ス テーション配管のほとんどの部分の一次評価が可能とな るものと思われる。

参考文献

- Hetenyi, M. : Beams on Elastic Foundation. Ann Arber : The University of Michigan Press, 1946.
- Iimura, S. and Sakai, Y. : Non-destructive method for the measurement of stress in bent pipes, D.V. Hemelrijck, A. Anastasopoulos & N. E. Melanitis (eds), *Emerging Technologies in NDT*, pp.219-224, Balkema, Rotterdam, 2004.
- 飯村正一:曲管の非破壊応力診断法について、土木 学会応用力学論文集, Vol.8, pp.931-942, 2005.
- 飯村正一:外力による断面扁平を利用した曲管の応力診断,土木学会論文集,No.798/VI-68, pp.17-30, 2005.
- 5) 飯村正一, 境禎明:磁気異方性センサを用いた曲 管の非破壊応力診断 — 面内曲げ—, 非破壊検査, Vol.55, No.10, pp.536-542, 2006.
- 飯村正一, 境禎明:磁気異方性センサを用いた曲 管の非破壊応力診断 — 面外曲げへの拡張—, 非破 壊検査, Vol.55, No.11, pp.580-587, 2006.
- 飯村正一:磁気異方性センサを用いた曲管の発災後 残留応力の非破壊診断, 日本地震工学会論文集, Vol.6, No.4, pp.1-18, 2006.
- 飯村正一:磁歪技術を用いた曲管の非破壊応力診断, 配管技術, Vol.49, No.9, pp.65-70, 2007.8
- 飯村正一、山口宏樹:磁気異方性センサによる曲管 及びその近傍の非破壊応力測定における測定位置の 影響評価、土木学会論文集F, Vol.65, No.1, pp.94-105, 2009.
- 10) 飯村 正一,山口 宏樹:袖管部断面扁平量からの 曲管部応力評価簡易法,土木学会論文集 F, Vol.65, No4, 2009. (10月19日登載決定)
- 11) 飯村正一, 境禎明:磁気異方性センサを用いた管路応力の非破壊診断精度の向上, 非破壊検査, Vol.59, No.1, 2010. (11月11日登載決定)
- 12) 飯村 正一,山口 宏樹:高さ調整による埋設管路の沈下応力解放工事を支援する簡易応力推定手法, 土木学会論文集 F, Vol.64, No.3, pp.283-294, 2008.
- 13) Iimura, S. : Simplified mechanical model for evaluating stress in pipeline subject to settlement, *JCBM*, Elsevier, Vol.18, No.6, pp.469-479, 2004.
- 14) ASME code for pressure piping, B31, ANSI/ASME B31.8, Gas transmission and distribution piping systems, ASME, NY, July 1, 1986.