

埋設管の腐食・第三者原因リスク環境下での検査・補修後の信頼性評価

武蔵工業大学 正員 小池 武

1. はじめに

長距離輸送に適した高圧ガスパイプラインは、エネルギー基地を起点とし、都市間を結ぶ幹線パイプラインとして建設されるが、そのルートは各種道路下や占用地であり、いくつかの河川、鉄道、道路横断部分を含むことになる。事前の調査結果に基づき管路敷設ルートは潜在危険度を有する地区を避けて設定されるのが原則であるが、多くの都市が沖積平野に立地し、埋立地での産業活動、都市生活が活発なわが国ではパイプラインルートが沖積地盤、とくに軟弱地盤地区を避けることができず、また場合によっては、液化化危険度を潜在的に有する地区にルートを設定せざるを得ない場合も想定しなければならない。そして、道路下への敷設は、将来第三者による掘削工事などに伴う管路破損の危険が常に付きまとうことになる。

長距離パイプライン建設当初は、一般外荷重（内圧、土圧、交通荷重、温度荷重など）に対する許容応力度設計により一定の安全性を確保するが、運用期間の経過により腐食・溶接欠陥からの亀裂の進展、第三者行為を原因とする管路損傷、地盤特性に依存する不同沈下そして地震による管路や付帯施設への影響などシステムの構造安全性が低下する事態が進展する。

本研究では（1）パイプラインの構造的損傷モードとして代表的な腐食欠陥およびへこみ(dent)などの潜在欠陥を有する管体の残存強度を推定し、つぎに（2）定期点検・補修作業により潜在欠陥レベルがある一定水準に維持される場合のパイプラインシステムの安全性評価手法について述べる。

2. パイプラインの破壊モード

2.1 腐食損傷モード

構造的損傷として、腐食やへこみによる管表面の損傷がある。これらの構造的損傷をもつ管は健全な管と比較すると強度劣化を免れない。ここでは、構造的損傷をもつパイプラインの残存強度推定手法について概説する。

Fig.1は、管体表面に腐食損傷が発生し、管表面の幅Wにおいて管厚がdだけ腐食している状況を示している。腐食深さは、経過時間τとともに進行する。いま、腐食深さの進行度合いdがAhammed & Melchers¹⁾の提案する次式で表現できると仮定する。

$$d^c = \zeta \tau^a \quad (1)$$

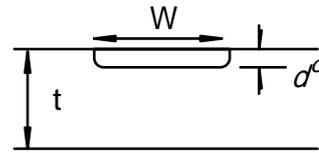


Fig.1 Corrosion crack in the pipe

ここで、係数a, ζは、それぞれ腐食劣化のパラメータであり、Ahammedらはa=0.53を採用している。

管表面の腐食や溶接欠陥などが存在する場合には、欠陥周辺部の応力集中のため、破壊開始円周方向応力が無欠陥の場合より低下する。Mok²⁾らによれば、長い腐食欠陥を有する管路の破壊開始円周方向応力 σ_{cr}^c は次式で与えられる。

$$\sigma_{cr}^c(\tau) = \sigma_{flow} \frac{1 - \frac{A(\tau)}{A_0}}{1 - \frac{A(\tau)}{MA_0}} \quad (2)$$

ここで、 σ_{flow} : 管材の限界強度, A: 欠陥部面積, W: 管表面欠陥長さ, t: 管厚、M: Folias factor²⁾

$$A_0 = tW, \quad A(\tau) = d^c(\tau)W \quad (3)$$

$$M = \sqrt{1 + \frac{1.255}{2} \left(\frac{W}{\sqrt{Dt}} \right)^2 - \frac{0.0135}{4} \left(\frac{W}{\sqrt{Dt}} \right)^4}$$

2.2 へこみ損傷モード

第三者によってもたらされる管路被害の典型的事例として管体のへこみ(dent)がある。

Fig.2に示すように、へこみ表面に傷を有する深いへこみ(dent with gouge)を考える。すなわち、深さ L_d のへこみが発生し、その表面にさらに深さdの傷が発生する場合を仮定する。このような傷を有するへこみの周方向強度 σ_{cr}^d は次式で与えられる。

$$\sigma_{cr}^d = \sigma_{flow} \frac{2}{\pi} \cos^{-1}(S) \quad (4)$$

ここで、

$$S = \exp \left[- \frac{1.5\pi E}{\sigma_{flow}^2 A d} \cdot \frac{\exp \left\{ \frac{\ln(C_v) - K_1}{K_2} \right\}}{\left\{ Y_1 \left(1 - \frac{1.8L_d}{2R} \right) + Y_2 \left(10.2 \frac{L_d}{2t} \right) \right\}^2} \right]$$

ただし、 σ_{flow} : 管材の強度(lbf/in²), E: ヤング係数(30,000,000 lbf/in²), A: 2/3Charpy試験片の破損部面積(=0.083 in²), d: 破損部深さ(in), L_d : ゼロ圧力で測ったへこみ部の深さ(in), R: 管の半径(in), C_v : 靱性値(2/3シャルピー靱性値, ft lbf), K_1, K_2 : 非線形パラメータで

埋設パイプライン, 腐食, へこみ, 点検, 補修, 破壊確率

〒158-8557 東京都世田谷区玉堤1-28-1, TEL:03-3703-3111, FAX:03-5707-2222, e-mail:tkoike@sc.musashi-tech.ac.jp

$K_1=1.9, K_2=0.57$ として Y_1, Y_2 は形状補正パラメータ。

3. 検査・補修間隔とシステムの破壊確率

パイプラインの運転が始まるとともに、パイプライン周辺環境の影響を受けて、その延長線に沿ってさまざまな潜在欠陥が生成する。しかし、定期点検とそれに続く補修業務が行われるとき、補修後の潜在欠陥は確実に減少するが、しかし皆無にすることはできない。それは、点検補修時の欠陥検出精度や補修の確実度に限界が存在するためであり、その状況を概念的に示したのが Fig.3 である。いま、潜在欠陥 D の検出・補修性能特性曲線が Fig.3 の $P[I|D]$ で与えられ、さらに点検前の潜在欠陥の存在確率が $P[D]$ の時、点検・補修後の潜在欠陥の確率分布 $P[D|I]$ は Bayes の定理に従って次式で求められる。

$$P[D|I] = \frac{P[I|D]P[D]}{\sum P[I|D]P[D]} \quad (5)$$

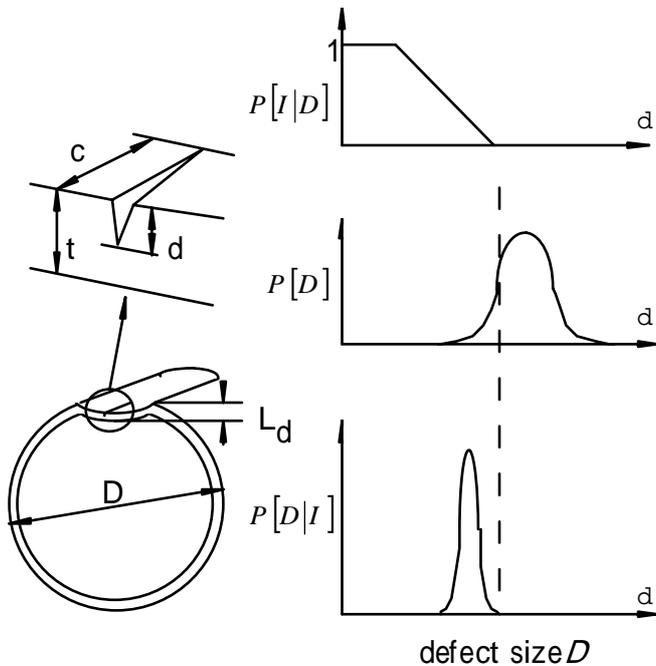


Fig.2 Dent profile with gouge Fig.3 Probability density of dent size revised through the inspection works

内圧 P が作用するパイプに発生する周方向応力 σ_h は腐食部分の局所応力集中ではなく無欠陥状態の管体を前提にして次式で求められる。

$$\sigma_h = \frac{PD}{2t} \quad (6)$$

したがって、時刻 τ におけるパイプの性能関数 $Z(\tau)$ は次式となる。

$$Z(\tau) = \sigma_{cr}(\tau) - \sigma_h \quad (7)$$

パイプラインが完成すると、時間経過とともに沿線にさまざまな管路被害要因が発生し空間的に分布するようになる。これらの管路被害要因の単位時間、単位長さ当たりの発生確率、すなわち危険率(hazard function)

を $\lambda_k(\tau, x)$ とする。 $\lambda_k(\tau, x)$ は、被害モード k が生成する潜在クラックによる経過時間 τ 、位置 x におけるシステムの危険率であり、式(6)の欠陥検出確率を用いることにより定期検査・補修後 τ 時間経過時点に対して次式で与えられる。

$$\lambda_k(\tau, x) = v_k(x, T) \int_0^{D_{max}} P[Z_k(\tau) \leq 0] f_{D_{k|I}}(\delta) d\delta \quad (8)$$

ここで、 $F_{D_{k|I}}(\delta)$ 、 $f_{D_{k|I}}(\delta)$ は被害モード k による潜在欠陥長さ D_k の点検補修後における確率分布関数およびその密度関数である。

また、 v_k は位置 x を含む領域の単位距離、単位時間において被害要因 k による潜在クラックの存在する確率であり、建設当初からの時間経過とともに潜在クラックが増加する傾向を表現する関数 $Q_k(t)$ と空間的な潜在クラックの発生率を表現する v_{0k} の積として次式で与えられるものと仮定する。

$$v_k(x, T) = Q_k(T) v_{0k}(x) \quad (9)$$

パイプラインの全長にわたる危険率 $\Lambda(\tau, L)$ は、上述のそれぞれの被害モード相互の独立性を仮定すると定期検査・補修後 τ 時間経過時点での危険率として次式で書き表すことができる。

$$\Lambda(\tau, L) = \sum_{k=1}^2 \int_0^L \lambda_k(\tau, x) dx \quad (10)$$

この時、区間長 L のパイプラインが期間 $[0, T]$ にわたって安全である確率 $R[T, L]$ は、第 i 回目の定期点検・補修直後の時点 T_i での信頼性 $R_0[T_i, L]$ とそれ以後の危険率 $\Lambda(\tau, L)$ により次式で与えられる。

第 i 回目定期検査・補修直後

$$R_0[T_i, L] = \exp\{-\Lambda(0, L)\} \quad (11)$$

第 i 回目定期検査・補修後 $(T - T_i)$ 時間経過時点

$$R[T, L] = R_0[T_i, L] \exp\{-(T - T_i)\Lambda(T - T_i, L)\} \quad (12)$$

ただし、

$$T_i = \sum_{j=1}^i \tau_j \quad (13)$$

以上より、区間 L 、定期点検間隔 ΔT におけるパイプラインシステムの破壊確率は次式で求められる。

$$p_f[\Delta T; T, L] = 1 - R[T, L] \quad (14)$$

4. まとめ

本研究で得られたシステムの破壊確率を用いると、供用期間中の最適検査間隔や維持管理コストの妥当性を判断するための事業収益性評価指標の算定が可能となる。

参考文献

1)Ahmed, M. and R.E.Melchers(1997):Probabilistic analysis of underground pipelines subject to combined stress and corrosion, Engineering Structures, Vol.19, No.12, pp.988-994.
2)Mok, D.R.B., R.J.Pick and A.G.Glover(1990):Behavior of line pipe with long external corrosion, General Interest, MP, pp.75-79.