

劣化を考慮した既設構造物の最適投資規模決定法

武蔵工業大学 学生会員 江原 季映 正会員 小池 武

1. はじめに

現代の社会生活や経済活動において、パイプラインは重要なインフラの一つとなっている。多くのパイプラインは地中に埋設されており、道路や鉄道下を横切ること荷重を受ける。荷重によって管表面には腐食が発生し、腐食は時間の経過と共に進行する。腐食が進行すれば管の強度は低下するので、安全性を維持するためには定期点検によって腐食を発見し、補修することが必要である。しかし、それらは多額の設備投資であるゆえ安全性を維持できる適切な維持管理が求められる。そこで、本研究ではいくつかの劣化とメンテナンスのモデルを仮定し、破壊確率とコストの観点からそれらを相互に比較することで最適な投資戦略を決定する。

2. ライフサイクルにおける構造物の維持管理

2.1 投資戦略モデル

構造物の維持管理を行う場合に考えられるパターンとして、次の4つの投資戦略を設定した。

(A)新設方式

維持管理活動を一切行わず、強度低下によって十分な性能を満たさなくなった時は、新たに建設する。

(B)長寿命化補強方式

定期点検と、腐食の補修・補強をセット行い、十分な強度回復が得られる維持管理活動を行う。

(C)補修方式

定期点検と、腐食の補修をセットで行い、ある程度の強度回復が得られる維持管理活動を行う。

(D)無対策方式

維持管理活動を一切行わず、建設時の初期性能のみで供用・運用していく。

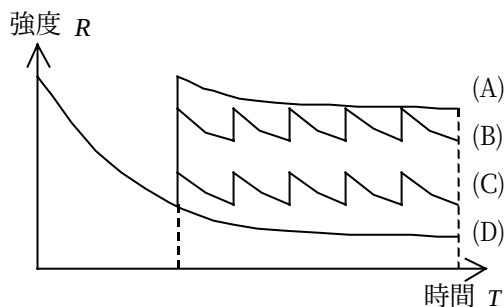


図1 投資戦略

2.2 ライフサイクルコストの設定

上記の投資戦略に関わるライフサイクルコストとして、次の5つの費用を設定する。ただし、各費用は初期建設費を基準として、 C_0 の実数倍で表すものとする。

C_0 : 初期建設費用

C_1 : 定期点検費用

C_2^* : 補修・補強費用

C_3 : 破壊損傷時の損害費用

C_4 : 廃棄費用

*...Bが補強、Cが補修

3. 構造物モデル

3.1 構造物と荷重モデル

本研究では、構造物モデルとして高圧ガスパイプラインを用いる。これは理論を一般化しやすく、かつ管が破壊に至った場合に大事故につながる危険性が高いためである。また、管に作用する円周方向応力度としては次の4つを考慮するものとする。

(1)内圧による円周方向応力度

(2)土圧による円周方向応力度

(3)列車荷重による円周方向応力度

(4)自動車荷重による円周方向応力度

3.2 腐食劣化モデル

図2は、管体表面に腐食が発生し、管表面の幅 W において管厚が Δd だけ腐食している状況を示している。時間 T に伴い進行する腐食深さ Δd は次式で表される。ここで、係数 ζ, a は、それぞれ腐食劣化のパラメータである。

$$\Delta d = \zeta \cdot T^a \quad (1)$$

次に、管表面に腐食や劣化などが存在する場合には、欠陥周辺部への応力集中によって破壊開始円周方向応力度 σ_{cr} が無欠陥の場合より低下する。前述した、腐食を有する管の σ_{cr} は次式で与えられる。

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

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、 D : 管外径、

$$A_0 = tW \quad (3)$$

$$A(T) = \Delta d(T) \cdot W \quad (4)$$

$$M = \sqrt{1 + \frac{1.255}{2} \left(\frac{W}{\sqrt{Dt}} \right)^2 - \frac{0.0135}{4} \left(\frac{W}{\sqrt{Dt}} \right)^4} \quad (5)$$

である。

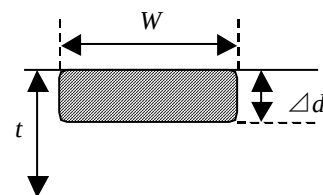


図2 管表面の腐食モデル

キーワード (維持管理, 投資戦略, 腐食劣化, LCC, 破壊確率)

連絡先 (住所: 東京都世田谷区玉堤1丁目28番1号, TEL: 03-3703-3111)

3.3 定期点検・補修後の残存強度推定

供用開始後に発生した潜在欠陥を、非破壊試験のような点検方法で100%検出することはできない。そこで、欠陥が検出される事象を I とすると、図3のように潜在欠陥 d の検出・補修性能特性曲線が $P(I|d)$ で与えられる。また、 $f(d)$ を点検・補修を行う前の事前確率密度関数とすると、ベイズの定理に従って、点検・補修後の事後確率密度関数 $f(d|I)$ を次式より求めることができる。次に、残存強度を変数 y とした時の確率密度関数 $f_R(y)$ を、図4のように導く。

$$f(d|I) = \frac{P(I|d)f(d)}{\int_{-\infty}^{\infty} P(I|x)f(x)dx} \quad (6)$$

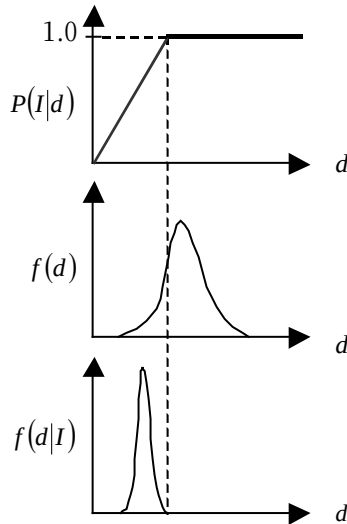


図3 点検・補修前後の欠陥深さの確率密度関数

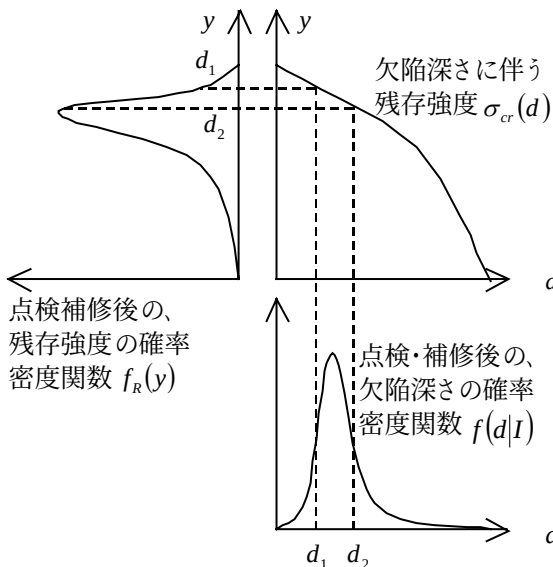


図4 残存強度の確率密度関数 $f_R(y)$

3.4 構造物の破壊確率

ここまで求めてきたパイプラインに作用する荷重と残存強度より、破壊確率を算出する。いま、作用する荷重が正規分布に従うものと仮定すると、荷重の確率密度関数 $f_s(y)$ は式(8)によって与えられる。残存強度の確率密度関数は $f_R(y)$ であるから、破壊確率 P_f^* は次式(7)より求めることができる。 $*$ …各投資戦略 $A \sim D$

$$P_f^* = \int_0^{\infty} f_R(y)f_s(y)dy \quad (7)$$

$$f_s(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left\{-\frac{(y-\mu)^2}{2\sigma^2}\right\} \quad (8)$$

4. 投資戦略のリスク評価

4つの投資戦略について、コストと破壊確率を導入して求めた R が、ライフサイクルコストを比較するための指標となる。ここで、 n は供用期間における定期点検回数である。

(A)新設方式

劣化した時点で新しく建設し初期性能が回復するため、維持管理を行わなくてもある程度長期間供用できる。

$$R = C_0 + C_4 + C_0 + C_3 \cdot P_f^A \quad (9)$$

(B)長寿命化補強方式

高額な長寿命化補強を施しているため、供用期間が短いと過剰投資になってしまう。

$$R = C_0 + (C_1 + C_2^B) \cdot n + C_3 \cdot P_f^B \quad (10)$$

(C)補修方式

最もスタンダードな方式である。

$$R = C_0 + (C_1 + C_2^C) \cdot n + C_3 \cdot P_f^C \quad (11)$$

(D)無対策方式

4つの投資戦略の中で破壊の危険が最も高く、供用期間が著しく短い場合にのみ有効である。

$$R = C_0 + C_3 \cdot P_f^D \quad (12)$$

5. 数値検討事例

管外径 $D=30(\text{cm})$ 、管厚 $t=0.8(\text{cm})$ のパイプラインを仮定し、供用期間 $T=80$ (年)、定期点検間隔 $\Delta t=20$ (年)、定期点検回数 $n=3$ (回)として数値計算を行った。

表1 数値計算結果

	(A)	(B)	(C)	(D)
C_0	1.0	1.0	1.0	1.0
C_1/C_0	—	0.01	0.01	—
C_2^*/C_0	—	0.05	0.03	—
C_3/C_0	0.5	0.5	0.5	0.5
C_4/C_0	0.02	—	—	—
P_f^*	7.56×10^{-5}	7.45×10^{-14}	1.26×10^{-12}	1.41×10^{-4}
R	2.02	1.18	1.12	1.00

6. 結論

本研究の検討事例から、維持管理活動を行う場合(B, C)に比べ、行わない場合(A, D)は著しく破壊確率が高くなっており、維持管理活動が破壊確率を低減させるのに有効であることが分かった。しかも、維持管理費用の増分は、当初の20%増程度におさまっていることも分かった。

参考文献

- (1)ガス事業法及び関連法規
- (2)小池武:パイプラインの腐食・第三者原因リスク環境下での点検・補修・安全性水準決定手法について
- (3)星谷勝(1986):構造物の信頼性設計法【鹿島出版会】
- (4)Alfredo H-S.Ang, Wilson H.Tang(1977):土木・建築のための確率・統計の基礎【丸善】