

確率制御理論を援用した水源揚水井の最適洗浄方策に関する考察

関西大学環境都市工学部
 関西大学環境都市工学部
 関西大学

正会員 ○兼清泰明
 フェロー 楠見晴重
 久保潤平

1. はじめに

本研究では、水源揚水井に対する定期的な目詰まり洗浄に基づく保守管理を対象に、揚水井の取水能力の時間劣化の不確実な特性を取り入れた確率モデルを構築したうえで、確率制御理論を援用することにより最適な洗浄方策の理論的な導出を試みる。

2. 水源揚水井の不規則劣化モデル

水源揚水井の比湧出量について、その運用開始時の値に対する相対的比率を健全度と定義し、この数値により揚水井の取水能力の時間劣化の度合を数量化する。京都府城陽市および八幡市での水源揚水井の実測データによると、揚水井の健全度の時間劣化は平均的には指数関数的な劣化挙動を示すが¹⁾²⁾、そのまわりに非常に大きなばらつきが認められる。この特性を次のような確率微分方程式で数学的にモデル化する。

$$dX(t) = -\mu X(t)dt - X(t-)dC(t) \quad (\mu = \mu_0 - \lambda q_1) \quad (1)$$

ここで、 $X(t)$ は時刻 t での揚水井の健全度、 μ は平均劣化係数、 $C(t)$ は劣化の不規則性を表現する複合 Poisson 過程をそれぞれ表し、 $C(t)$ の強度を λ 、不連続ジャンプの平均を q_1 とする。

式 (1) を $C(t)$ のサンプルごとに数値的に解いて得られた $X(t)$ のサンプル挙動と実データ¹⁾ との比較を図 1 に示す。

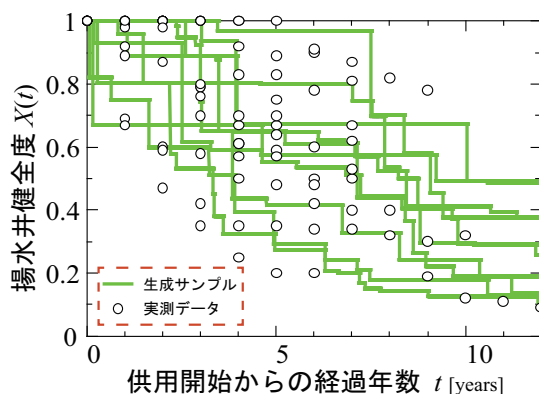


図 1 提案モデルより得られる健全度劣化のサンプル挙動と実データ¹⁾ との比較

3. 揚水井の洗浄による保守プログラムの設定と定義

本研究では、次のような洗浄補修方策に基づく保守プログラムを行うものとする。

- 保守計画期間を $(0, T)$ として、この間に M 回の定期点検を行う。
- 時刻 u_i で点検を施した結果、健全度が x であったと判明したら、 x を $x + \alpha_i(x)$ に増加させる洗浄を行う。
- 点検実施時刻以外で健全度がある限界値 x_c を下回った場合は揚水井の破壊に匹敵する劣化が生じたと判断し、緊急の大規模補強を行う。

ここで、点検を実施した時刻 u_i において判明した健全度が x 、実施した洗浄補修量が a のときの点検コストと洗浄補修コストの和を $R_i^{\text{REP}}(x, a)$ 、時刻 t で健全度 x が限界健全度 x_c を下回った場合に生ずるコストを $R^{\text{RIF}}(t, x)$ で表す。点検時刻 u_{i-1} から u_i の間の時刻 s において、健全度が x であるという条件の下で s から計画終了時刻 T までの時間区間に発生する総コスト $K_i^{A_i}(s, x)$ は次式で表される。

キーワード：水源揚水井、洗浄、保守、最適化、確率制御

連絡先：〒564-8680 吹田市山手町 3-3-35 関西大学環境都市工学部 hiro.t.k@kansai-u.ac.jp

$$K_i^{A_i}(s, x) = \sum_{\ell=i}^M R_{\ell}^{\text{REP}}(X^{A_{\ell}}(u_{\ell-}; s, x), a_{\ell}) + \int_s^T R^{\text{RIF}}(u, X^{A_i}(u-; s, x) \{1 - dC(u)\}) dN_F^{A_i}(u; s, x) \quad (2)$$

ここで、 $X^{A_i}(t; s, x)$ (ただし、 $s \leq t \leq T$) は制御 A_i の下で条件 $X^{A_i}(s; s, x) = x$ を満たす健全度の劣化過程を、 $N_F^{A_i}(t; s, x)$ は条件 $X^{A_i}(s; s, x) = x$ 、制御 A_i の下で時刻 $t (s < t \leq T)$ までに発生した破壊の累積回数を表す計数過程を表し、これは $C(t)$ に従属する確率過程となる。式 (2) の第一項は、時刻 u_i 以降の点検で発生する点検・洗浄補修コストの総和を表し、第二項は、時刻 s 以降に発生する破壊損失コストおよびその直後に必要となる緊急の大規模補強コストの総和を表している。

式 (2) で与えられる総コスト $K_i^{A_i}(s, x)$ の期待値 $J^{A_i}(s, x) = E\{K_i^{A_i}(s, x)\} (i = 1, \dots, M)$ を目的関数とし、これを次のように最小化した $A_i^* = \{a_i^*, a_{i+1}^*, \dots, a_M^*\}$ を最適制御とする。

$$J^{A_i^*}(s, x) = \inf_{A_i} J^{A_i}(s, x) = V_i(s, x) \quad (i = 1, \dots, M) \quad (3)$$

4. 数値例

前節で定式化した最適方策は、確率制御理論を適用することにより理論的に導出することができる。ここでは、文献3)で示した解析手順と同様の手順を用いて最適方策を数値的に導出する。

式 (2) 中に現れる点検コスト・補強コスト・破壊コストはそれぞれ一定値を取るものとし、洗浄補修コストについては洗浄補修量が増大するにつれてコストが増大するように設定する。図2は、保守計画期間 $T = 40$ [years]、点検洗浄回数 $M = 9$ (点検間隔4年) の場合について、最適洗浄補修量を与える関数 $\alpha_i(x)$ を各点検時刻における健全度 x の関数としてプロットしたものである。また図3は図2の最適洗浄の下での目的関数 $V(s, x)$ をプロットしたものである。

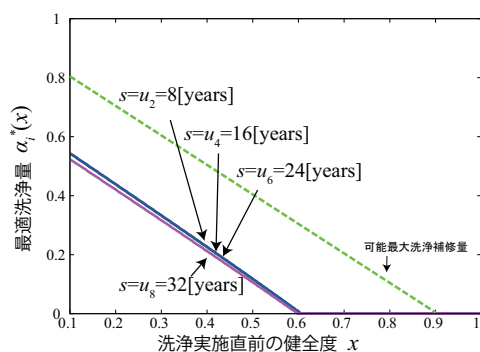


図2 最適洗浄量を与える関数 $\alpha_i^*(s, x)$.

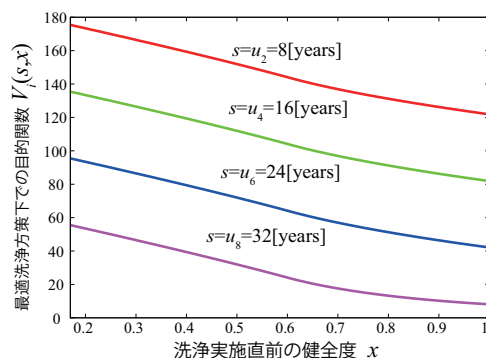


図3 最適洗浄方策下での目的関数 $V_i(s, x)$.

図2より、点検時の健全度 x が小さくなるほど最適洗浄補修量は大きくなるが、最後の点検実施時刻を除いては最適洗浄補修量が点検実施時刻の影響をほとんど受けないことがわかる。これは、供用終了に近い時間帯を除いては劣化と洗浄による回復が繰り返されることにより、保守残り期間の長さがあまり影響しなくなるためと考えられる。

5. おわりに

今後は構築した確率モデルによる実データの再現性に関する詳細な検討や、解析に取り入れるコストの種類およびコスト関数の形状について考察していくことが必要となると考えられる。

参考文献

- 1) Yamamoto, T., H. Kusumi and T. Kitaoka: "Simulation analysis of 3D seepage groundwater flow and Making of 3D geological structure model in multilayered ground", *Proc. of EIT-JSCE Int. Sympo. on Human Resource Development for Disaster-Resilient Countries*, CD-ROM 2013.
- 2) 中寺美月、楠見晴重、大西有三, "京都府南山城地域における水源揚水井の維持管理に関する研究", *Kansai Geo-Symposium 2017*, ー地下水地盤環境・防災・計測技術に関するシンポジウム, 地盤工学会, CD-ROM, 2017.
- 3) 兼清 泰明, 丸山 収, 須藤 敦史, 佐藤 京, "定期点検下でのトンネル覆工コンクリートの最適保守方策に関する考察", 第63回理論応用力学講演会講演論文集 (Proc. of NCTAM 2014), 論文 No. OS06/OS14-02-03, 2014.