

I-531

経年劣化を考慮した水圧鉄管の信頼性評価

東北電力(株) 正会員 氏家久芳・佐々木明
(株)大崎総合研究所 正会員 ○ 稲田 裕・鈴木 誠

1. はじめに

水力発電所の水圧鉄管などの鋼構造物は疲労、腐食といった経年劣化により耐荷力が低下し被害を受けるため、定期検査や詳細な検査をもとに補修や取り替えなどの対策が行なわれている。しかし、従来の維持・補修計画では、劣化の程度の判定があいまいであることから寿命の判断について技術者の経験によるところも多く、理論的な判断基準が示されてはいない。近年、材料や外力等の不確実性を統計・確率的に考慮して構造物の劣化や損傷を解析的に評価し、維持・補修計画の立案を行なう手法として信頼性理論に基づく手法が提案されている。本研究ではマルコフ連鎖モデルに基づき水圧鉄管の経年劣化を評価する手法を開発し、実構造物の維持・補修計画の立案への適用を試みる。

2. 解析手法の概要

a) 水圧鉄管のモデル化：水圧鉄管に経年劣化を生じさせる外力としては、内部水圧とその変動が重要である。内部水圧により鋼管は軸に垂直な断面で押し広げられ、周方向の繰り返し応力により図-1に示すような疲労き裂が発生する。ここでは、疲労き裂の成長を発生段階と伝播段階に分け、初期状態から一定深さの表面き裂が発生し、楕円形状を保ったまま板厚方向にき裂が成長していくものとし、き裂深さが板厚に達し貫通き裂となるまでを寿命と考える。

b) マルコフ連鎖モデルによる劣化の評価手法：マルコフ連鎖モデルを用いた疲労解析の研究は Bogdanoff ら¹⁾により提案され、最近、国内では藤本らにより研究が進められている²⁾。著者らも鋼管の劣化評価手法を開発し、栈橋の鋼管杭について波の繰り返し荷重による劣化の評価を行なった³⁾。ここでは水圧鉄管に適用するための定式化を行なう。

c) 応力の算定と疲労、破壊の評価：水圧鉄管には充水および排水時、運転開始および停止時また定格運転時にそれぞれ静水圧、上昇水圧および水圧変動による応力が発生するため、応力範囲と繰り返し数が異なる複数の応力を考慮する。ここで水圧変動による応力は確率変数として扱う。このような構造物の被害はマイナー則を用いて定式化し、き裂発生過程についてはS-N線図を、伝播過程は伝播速度の評価式としてパリス則を用いる。き裂を有する鋼管に脆性破壊が発生する確率の計算は、COD理論を拡張した藤本らの破壊条件の定義を用いて行なった。

d) 点検・補修のモデル化：マルコフ連鎖モデルでき裂の成長をM段階に離散化し、状態*i*におけるき裂発見確率(検査能力)を E_i とすると、検査後の状態確率ベクトルの要素 $u_i'(n)$, $\{i=1,2,\dots,M-1\}$ は式(1)ようになる。完全補修モデルでは $H=0$ 、部品交換モデルでは $H=1, L=M-1$ 、交換モデルでは $H=1, L=M$ である。またき裂発見確率 E_i はき裂の深さ a_i にしたがう式(2)のようにした。 a_0 は検出可能な最小のき裂深さ、 d はき裂発見率を表わすパラメータである。

e) 初期欠陥のモデル化：鋼構造物は部材や溶接部に表面き裂や内部空洞等の初期欠陥を有することが少なくない。そこで、表面き裂状の初期欠陥を仮定し、欠陥寸法の確率分布としてき裂深さ x の分布 $f_x(x)$ を次の指数分布で定義した。

$$f_x(x) = \frac{1}{\lambda} \cdot \exp\left[-\frac{x}{\lambda}\right] \quad (3)$$

λ は初期欠陥の平均値であり、 P_{ID} を初期欠陥の存在確率とすると、き裂深さ x の初期欠陥の確率分布 $g_{ID}(x)$ は次のようになる。

$$g_{ID}(x) = (1 - P_{ID}) \cdot \delta(x) + P_{ID} \cdot f_x(x) \quad (4)$$

ここで、 $\delta(x)$ は Dirac の δ 関数である。

3. 数値計算結果とその考察

a) 計算条件：実際の水力発電所の水圧鉄管について経路上から応力が大きくなると考えられる検討位置を選び、静水頭および上昇水圧から常時水圧による応力と上昇水圧による応力を求めた。各応力と繰り返し数を表-1に示す。また、鋼管の材料特性について降伏応力と限界応力拡大係数は、

$$E[\sigma_Y] = 27 \text{ kg/mm}^2, \quad E[K_{IC}] = 350 \text{ kg/mm}^{1.5}$$

とおき、変動性を考慮するため正規確率変数と仮定した。

$$u_i'(n) = H \left\{ \sum_{j=1}^L E_j u_j(n) \right\} \cdot u_i(0) + (1 - E_i) \cdot u_i(n) \quad (1)$$

$$E_i = 1 - \exp[-d(a_i - a_0)] \quad (2)$$

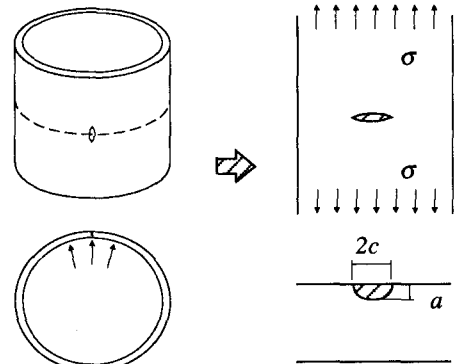


図-1 表面き裂のモデル図

b) 検査・補修の効果：定期的な検査で異常が発見されれば修繕するという完全補修モデルとし、検査時期および間隔を検討する。き裂発見率のパラメータ d を0.2と0.4にした場合について、検査間隔を10年と20年としたときの破壊確率の経時変化を検査・補修を行わない場合と比較して図-2に示す。補修を行わないと破壊確率は運転開始40年を過ぎるころから急速に大きくなる。この時期から定期的な検査、補修を行えば破壊確率の増加を抑えることができる。また、検査の精度を上げ発見率が増加すれば同じ検査間隔でも破壊確率は減少する。

c) 初期欠陥の影響：初期欠陥の存在確率を0, 0.005, 0.01の3ケースに変化させ、破壊確率に及ぼす影響を評価する。破壊確率の小さな時期における差が明らかとなるように破壊確率を対数軸で表わした結果を図-3に示す。初期欠陥は供用期間が短い間は破壊確率に影響するが、40年程度経過するとその影響は小さくなる。

d) 板厚減少の影響：腐食・磨耗等により板厚が衰耗する場合の影響を考える。ここでは年間減少率を0, 0.01, 0.02, 0.03 (mm/year) とした4ケースの破壊確率を図-4に示す。劣化については疲労き裂の成長が腐食・磨耗に比べて優位であり、板厚減少は構造物の寿命にあまり影響していない。

4. まとめ

本研究では構造物の維持・保全を考慮した信頼性設計法として、マルコフ連鎖モデルを用いた鋼管の劣化評価手法を開発し、水力発電所の水圧鉄管を対象に補修計画立案への適用を行なった。そして、検査時期、間隔、初期欠陥および板厚減少などが構造物の寿命に与える影響について検討し、き裂発見率が重要であることを示した。

参考文献 1) Bogdanoff & Kozin : Probabilistic Models of Cumulative Damage, J. Wiley & Sons, 1985. 2) 藤本ら: マルコフ連鎖モデルによる劣化型損傷部材の信頼性評価, 日本造船学会論文集, Vol.166, p.303, 1989. 3) 氏家ら: 信頼性理論に基づく栈橋鋼管杭の疲労・腐食評価, 海岸工学論文集, Vol.39, p.1071, 1992.

表-1 荷重条件

	水頭 h (m)	応力範囲 $\Delta\sigma$ (kg/mm ²)	繰り返し数 F (cycle/year)
常時水圧による応力	64.865	7.297	0.1
上昇水圧による応力	9.500	1.068	2.0
振動による変動応力	—	1.000	1.10E+8

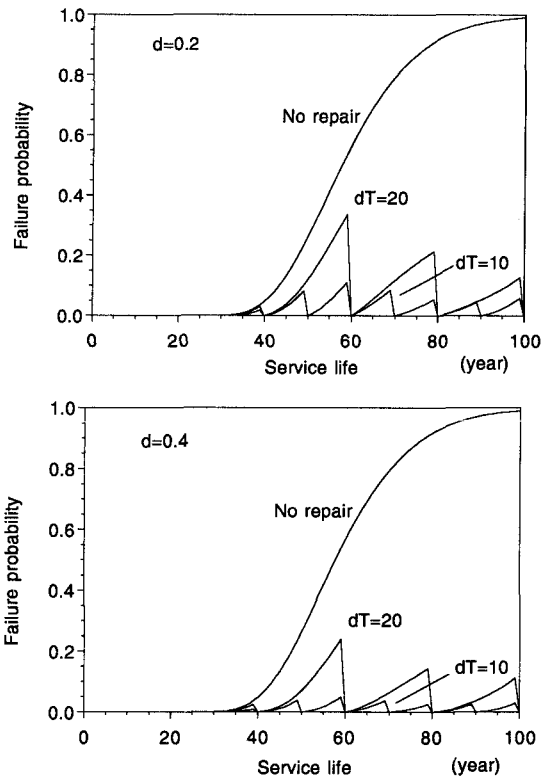


図-2 検査間隔・補修の影響

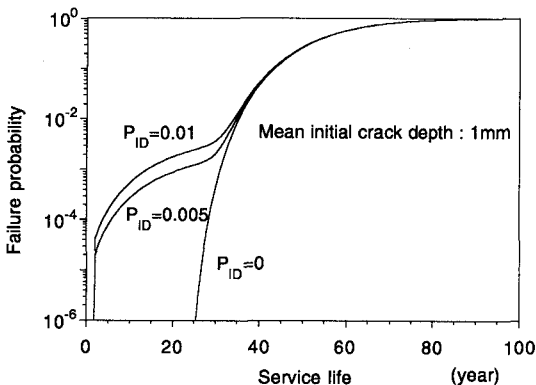


図-3 初期欠陥の影響

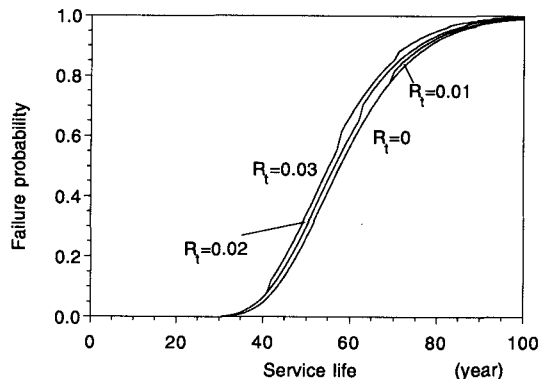


図-4 板厚減少の影響