

海岸保全施設の劣化・変状遷移評価解析モデルに関する研究

清水建設株式会社
独立行政法人港湾空港技術研究所
独立行政法人港湾空港技術研究所
清水建設株式会社

正会員 ○辻岡 信也
正会員 横田 弘
正会員 関根 好幸
正会員 稲田 裕

1. はじめに

今後多くの海岸・海洋構造物が老朽化を迎える中、これらを全て新規に建設を行うことは、現在の社会情勢を考えれば、決して現実的ではなく、維持・保全を効率的に行うシステムが求められている。その構築のためには、どの時点で補修を行うことが最も費用対効果が大きいかを把握する必要がある。そこで本研究では、劣化・変状の基本的なモデルを想定し、余寿命評価や補修計画への適用を行うための手法を検討した。

2. マルコフ連鎖モデル

本研究では劣化・変状などに実績があるマルコフ連鎖モデルを用いて劣化・変状遷移を表現した。

マルコフ連鎖モデルとは、ある状態から他の状態に遷移する確率が現在の状態によってのみ決まるモデルである。劣化・変状遷移を表現するために、本研究では、Bogdanoff らによって提案されたき裂伝播のマルコフ連鎖モデルを発展させて用いる。

このモデルの特徴は、き裂状態と使用時間（荷重繰り返し数）の両方を離散的に取り扱う点にあり、工学的精度でき裂伝播の分布特性をよく近似できることが明らかにされている。

マルコフ連鎖モデルでは状態をベクトルで表現する。初期状態の確率は、状態ベクトル $A(0)$ によって決定され、 n ステップ後の状態ベクトル $A(n)$ は $A(n) = A(0)P^n = \{a_1(t), a_2(t), \dots, a_n(t)\}$ と表現される。このとき、 $A(n)$ の要素 $\{a_1(t), a_2(t), \dots, a_n(t)\}$ は状態の数だけ存在し、要素のそれぞれがその状態にある存在確率を示している。また、 P を遷移確率行列という。本研究では、状態遷移は Unit Step B Model に従う一様マルコフ連鎖モデル ($p/q = \text{const}$) であると仮定した。Unit Step B Model は、ある状態から次の状態へのみ遷移するモデルである。Unit Step B Model における状態遷移のモデル及び状態ベクトルと遷移確率行列の関係を概念図として図-1 に示す。状態遷移行列は図中の式(1)に示される形で表現される。式(1)中の p_i は時刻 t に状態 i にいたものが単位時間経過後も状態 i に留まる確率、 q_i は $i+1$ に推移する確率で、 $p_i + q_i = 1$ である。最終状態が破壊状態を示していると考えれば、 n ステップ後の破壊確率は $p(t) = p_n(t)$ と表される。 p_i と q_i の比を $r_i = p_i/q_i = \text{const}$ （一様マルコフ連鎖）と仮定すると、状態 1 から状態 b に達するまでの時間 T の平均と分散はそれぞれ $E(T) = (b-1)(1+r)$ 、 $\text{Var}(T) = (b-1)r(1+r)$ と表される。ここで、 $E(T)$: 推移時間 T の平均、 $\text{Var}(T)$: 推移時間 T の分散、 b : 状態の分割数 = 遷移確率行列の次数である。この式により、 r を求めれば $p_i + q_i = 1$ より p_i と q_i がそれぞれ求まり、遷移確率行列を得る。

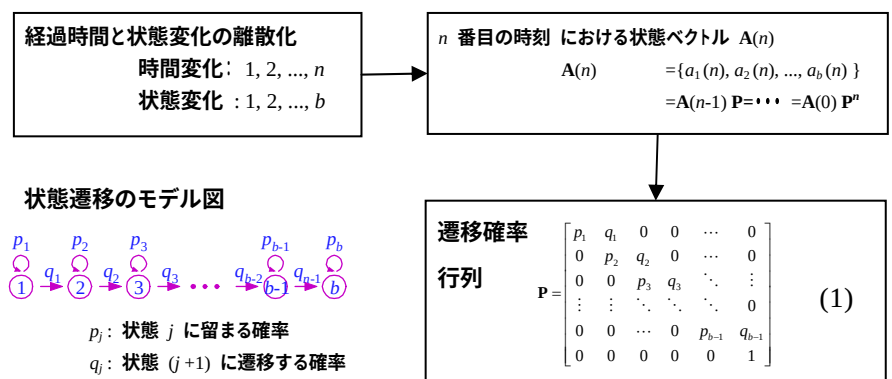


図-1 マルコフ連鎖モデルの概念図

3. 劣化・変状遷移評価システムを用いたケーススタディ

本研究の仮定によるマルコフ連鎖モデルでは、初期状態ベクトルを決めてしまえば、破壊までの時間の平均値と分散の2つのパラメータのみで破壊確率の時間変化は決まることになる。この2つのパラメータの変化が破壊確率に与える影響を把握することは、マルコフ連鎖モデルを理解することに有効である。本研究では初期状態から破壊に至る時間の平均値と分散がわかっている試算検討対象を用意し、分散を変化させたときに検討対象の破壊確率の時間変化及びある時間における状態ベクトルにどのような影響が現れるかを確認する。

初期状態から破壊状態に至る平均の時間を40年とし、分散を5, 10, 20と変えた場合(それぞれケース1, 2, 3とする)3ケースについて試算を行う。なお、初期状態は完全に健全な状態($A(0) = \{1, 0, \dots, 0\}$)であるものとして計算を

キーワード マルコフ連鎖モデル, 海岸保全施設, 損傷確率, 維持管理, 補修計画

連絡先 〒105-8007 東京都港区芝浦1-2-3 清水建設(株)土木事業本部設計部 TEL:03-5441-0598 E-mail: tsujioka@shimz.co.jp

行い、 n 年後に破壊する（最終状態に到達する）確率及び、初期状態から破壊（最終状態）までの幅を 1 として各ケース基準化した 10 年ごとの状態ベクトルの二点の比較を行う。

4. 試算検討結果の評価

p , q , b の計算結果を表-1 に示す。計算では分割数を整数にするために分割数を切り上げた後、分散を再計算している。

続いて、得られた破壊確率の時間変化を図-2 に示す。分散が異なることで、破壊確率の時間変化にも違いが現れている。まず、分散が大きいほど早い時期から破壊確率が増加することがわかる。破壊確率が 50%を越えるところでその関係は逆転し、分散の小さいほどその破壊確率は短時間で 100%に近づく。ただし、一般的には破壊確率が 50%を越える年数を構造物の寿命とすることは有り得ず、破壊確率が 10%以下の部分で評価されることが多いことを考慮すると、分散が大きいほどその構造物の破壊確率は早い時期から増加するため、寿命が短い可能性を有する。また、50%の破壊確率に到達する年数は平均値のみによって決まり、本検討のように平均値が同じ場合は、その分散によらず一定であることがわかる。

次に、10 年ごとの状態ベクトルを比較する。それぞれの経過年ごとに 3 ケースの状態ベクトルを図-3 に示した。なお、グラフ中 x 軸の 0 は初期状態を、1 は破壊状態（状態ベクトルの最終要素）を示している。構造物の損傷が進むに従って、どの状態にあるかの時間的ばらつきは大きくなる。一方、分散の影響に関しては、分散が大きくなるほどグラフのピークは低くなり、山のすそ野は広がっている。分散はばらつき具合を表現する統計量であり、これが大きくなると状態の存在確率のばらつきが大きくなるのは自明であり、それがグラフにも表れている。

この結果より、マルコフ連鎖モデルに Unit step B model を採用した場合、初期状態から破壊に至る時間の平均値によって n 年後に到達する確率の最も高い状態が決まり、分散によってその状態にある不確定性（グラフの裾野の広さ）が決まると考えて良いことがわかる。試算の結果、この手法を用いることにより、破壊確率や状態ベクトルの時間変化を算定し、劣化の進展を評価することが可能であることが分かった。

5. 今後の課題

本検討では、海岸保全施設（三面張防潮堤）の余寿命評価や補修計画への適用を行うための一手法として、マルコフ連鎖モデルの適用を検討した。また簡単なケーススタディにより、その有効性を示した。

今後、複数の状態変化（レベル）を含むような劣化事象の評価や、劣化進展過程での破壊の発生等の評価を行う。同時に、対象構造物である海岸保全施設（三面張防潮堤）の劣化に関する調査結果を基に、実際の劣化寿命の平均値やばらつきを入れた評価を行い、実用上の有効性の検討を行う。

参考文献

- ・ Bogdanoff, J.L., F.Kozin: Probabilistic Models of Cumulative Damage, J.Wiley & Sons, New York, 1985.
- ・ 伊藤学, 亀田弘行, 黒田勝彦, 藤野陽三: 「確率統計の応用」, 丸善, 1988., 584p
- ・ 藤本由紀夫: 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, 1989.

表-1 各ケースの状態数及び遷移確率

平均値 $E(T)$	分散 $Var(T)$	状態数 b	p/q r	次のステップに移る確率 p	現在のステップにとどまる確率 q
40	4.444	37	0.111	0.100	0.900
40	10.000	33	0.250	0.200	0.800
40	19.259	28	0.481	0.325	0.675

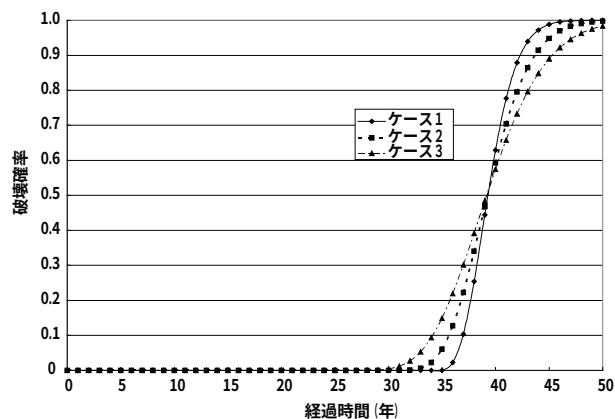


図-2 破壊確率の時間変化

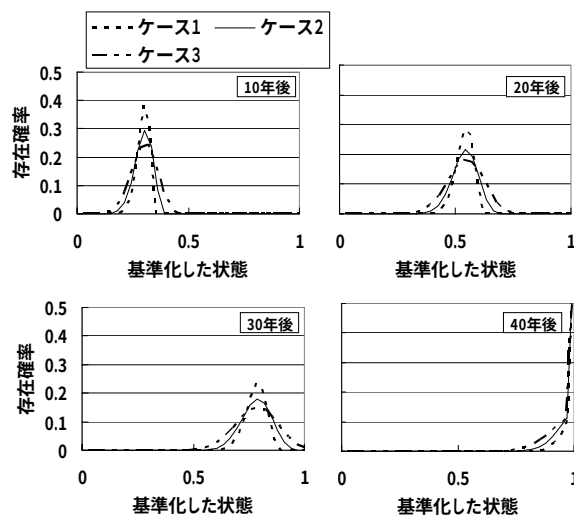


図-3 10 年ごとの状態ベクトル