

劣化・変状を含む海岸保全施設の破壊確率算定手法に関する研究

辻岡 信也*・横田 弘**・関根 好幸***・稲田 裕****

本研究では、三面張防潮堤の劣化・変状の遷移を評価するための解析モデルの構築を目的として、確率統計的な劣化評価システムの適用を図った。ここでは、海岸保全施設の劣化・変状に係わる既往の研究成果に基づき、堤体盛土の吸出しによる空洞化の進展と堤体の前法面コンクリートの破壊の発生を評価対象として検討を進めている。そして、状態変化と破壊事象の発生を、破壊発生を考慮したマルコフ連鎖モデルにより表し、破壊確率を一次ガウス近似法で求める評価システムの開発を行った。さらに、試算によって開発した評価システムの有効性を示すとともに、対象構造物の劣化・変状の特性に関して検討を行った。

1. はじめに

近年、海岸保全施設の老朽化が社会的な問題となっており、効果的な維持保全対策の立案のために非破壊検査技術の適用や対象構造物の健全性や余寿命を判断するための評価手法に関する研究が進められている。作用する荷重の不確実性が大きく、劣化の激しい海岸・海洋構造物の劣化・変状評価では、外力や材料、基礎地盤等の特性のばらつきを考慮した評価が重要である。代表的な海岸保全施設である三面張防潮堤は、堤体盛土の吸出しによる空洞化によって耐波性能が減少した結果、堤体の破壊に至ることが多いため、その劣化・変状評価では、吸出しの進行状況と空洞化による破壊確率の増加を考慮することが求められる。既往の研究により吸出しのメカニズムについては明らかにされてきているが（山田ら、2001）、空洞化の進展の定量的評価や、破壊の発生確率への影響度の検討等はこれまであまり行われていない。

本研究では三面張防潮堤を対象とし、劣化の進展過程を確率過程で扱うことができる手法として、マルコフ連鎖モデルに基づく状態変化の評価手法を構築し、劣化・変状の特性を検討する。マルコフ連鎖モデルを用いた劣化評価としては、Bogdanoff ら（1985）が疲労過程をマルコフ連鎖モデルを用いて表したものがある。また、藤本ら（1989）は鋼管の疲労亀裂の発生・進展評価にマルコフ連鎖モデルを適用し、劣化や破壊の特性を明らかにしている。さらに著者の一人（氏家ら、1992）も、栈橋鋼管杭の疲労・腐食評価にマルコフ連鎖モデルを適用した劣化・変状評価を行い、維持・補修の効果も導入し、点検間隔などの最適化について検討している。本検討ではこれらの研究成果を参照し、さらに損傷確率を信頼性理論により算定することにより、三面張防潮堤の損傷を考慮した劣化変状評価手法の構築と評価を行う。

2. マルコフ連鎖モデルによる評価手法

（1）三面張防潮堤の劣化・変状

盛土材の吸出しによる三面張防潮堤の劣化・変状の評価モデルを図-1 に示す。吸出しによる空洞化の進展は、堤体の健全性に影響が大きく、ある程度まで空洞化が進むと海岸保全施設としての機能や安定性を保持できなくなる。劣化・変状の評価では、その進展状況を適切に評価することが求められる。さらに、図に示すように、空洞化が進展すると盛土材による前法面の支持力が低下するため、波力により堤体が損傷する可能性が増大する。したがって、空洞化による変状の進展過程の途中から破壊へと至るような変状の考慮も求められるため、空洞化の進展とそれに伴う損傷確率の変化とともに考慮した解析を行う必要が生じる。また、空洞化の進展、損傷の発生とともに、外力や強度特性のばらつきを受けるため、変数のばらつきを十分考慮した検討手法を構築することが重要である。なお、以下の検討では波力による堤体の破壊を「損傷」と呼ぶ。また、劣化の進展と損傷の発生により防潮堤が機能や安定性を保持できなくなった状態を「破壊」と呼ぶこととする。

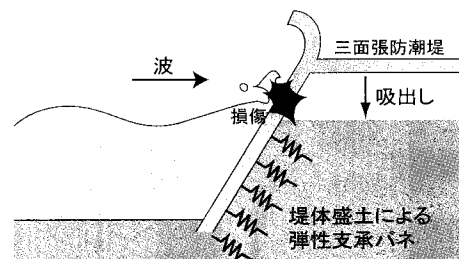


図-1 防潮堤の劣化・損傷

（2）損傷の発生を考慮したマルコフ連鎖モデル

マルコフ連鎖モデルによる状態変化の評価のモデルを図-2 に示す。本検討では、吸出しによる状態の遷移を次の状態への遷移のみを考慮する Unit Step B-model

* 正会員 工修 清水建設(株) 土木事業本部設計部

** 正会員 工博 (独法)港湾空港技術研究所 構造強度研究室 室長

*** 工修 (独法)港湾空港技術研究所 構造強度研究室

**** 正会員 工修 清水建設(株) 技術研究所

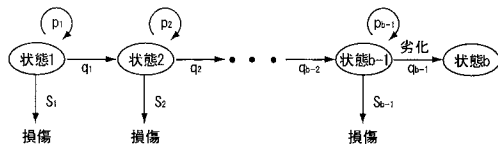


図-2 破壊の発生を考慮したマルコフ連鎖モデル

(Bogdanoff, 1985)により表す。また、状態 i にいたものが単位時間後に状態 $i+1$ に遷移する確率の割合 $r_i = p_i/q_i$ (p_i は現在の状態にとどまる確率、 q_i は次の状態に進展する確率)は、 i に係わらず一定値 r とする。そして、図中に示すように各状態において損傷が発生し、一気に破壊状態に達するような状況を組み込んだ評価モデルを構築する。状態 i において破壊に達する確率を S_i とすると、破壊に至らない残りが r の割合で推移すると考えることができるため、 p_i と q_i は式(1)のように表される。

$$p_i = \frac{r(1-S_i)}{1+r}, \quad q_i = \frac{1-S_i}{1+r} \quad \dots\dots\dots (1)$$

そして得られた損傷確率 S_i と状態遷移確率 p_i, q_i を用いて、遷移確率行列 P は式(2)のようになる。

$$P = \begin{bmatrix} p_1 & q_1 & & & S_1 \\ & p_2 & q_2 & & S_2 \\ & & \ddots & \ddots & \vdots \\ & & & p_{n-1} & q_{n-1} & S_{n-1} \\ 0 & & & & 1 \\ & & & & 1 \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ある時間ステップ n における状態を、状態ベクトル $A(n) = \{a_1(n), a_2(n), \dots, a_b(n), a_{b+1}(n)\}$ で表すと、 $A(n)$ は式(3)のように求めることができる。

$$A(n) = A(0) \cdot P^n \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 $A(0)$ は初期時間における状態ベクトルを表す。

以上の結果から、遷移確率行列と初期時間の状態ベクトルが与えられれば、任意の時間ステップの状態ベクトルを算定することができる。

対象構造物の劣化・変状の評価のフローを図-3に示す。状態の遷移のみを表すマルコフ連鎖モデルでは、同図の左側に表すように、劣化の進展速度から状態の分割数及び遷移割合を求め、遷移確率行列を算定する。本手法では、吸出し速度からマルコフ連鎖モデルの分割数と遷移割合が算定された段階で、図中の右側に表すように、1次ガウス近似法を用いて各状態における損傷確率を求める。得られた損傷確率を再度マルコフ連鎖モデルに持ち込み、遷移確率を再計算し、最終的な遷移確率行列を算定する。そして、得られた遷移確率行列を用いて、劣

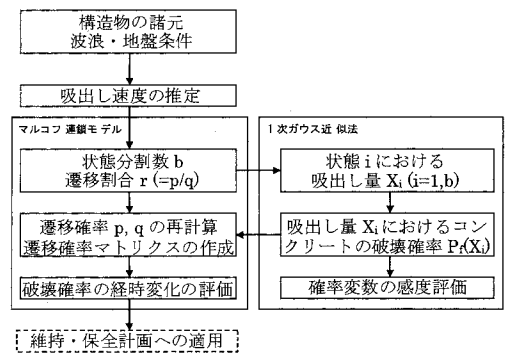


図-3 損傷を考慮したマルコフ連鎖モデル評価フロー

化・変状の状態変化、特に破壊確率の経時変化の評価を行う。

ここで、遷移確率行列に導入する損傷確率は、信頼性理論に基づいて算定する。様々な近似手法により工学的に問題ない精度の損傷確率を算定することが一般的であるが、本検討では損傷確率を一次ガウス近似法により算定し、損傷確率 S_i として遷移確率行列に組み入れる。

(3) 損傷確率の評価手法

a) 構造モデルの設定

本研究では、図-4に示すような2次元モデルに基づいて損傷確率を算定する。前法面コンクリートを薄い板状の部材と考え、一端を海底地盤に、もう一端は天端と裏法に張られたコンクリートに固定する。また、コンクリート背面の盛土によって支持されている状態を、弾性支承上の梁としてモデル化する。吸出しによる空洞化の発生の影響は、図-4に示すように、空洞化発生部分の地盤ばねを取り外すことによって考慮することができる。

堤体盛土の吸い出しによる空洞化の進展状況については未だ定量的な評価手法は確立されておらず、また点検データも多くはない。そこで本検討では、吸い出し量は時間経過に比例するものと仮定した。このとき、最終状態における土の吸い出し量が全体の $X\%$ であるとする

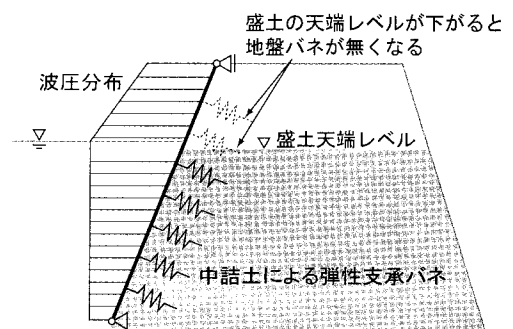


図-4 前法面コンクリートのモデル化

と、状態を n 個に分割したマルコフ連鎖モデルにおいて、状態 i における土の吸出し量 $x(\%)$ は、式(4)のように表すことができる。

$$x = \frac{i-1}{n-1} X \dots\dots\dots (4)$$

堤体盛土が吸い出されるに伴い、堤体上部から空洞化が発生し空隙が出来ることは確認されているが、その進展状況については十分には明らかにされていない。そこで、ここでは最も基本的な状況として、天端レベルが水平な状態を保ちつつ空洞化が進展するものと仮定する。

b) 前法面コンクリートの限界状態

本研究では前法面コンクリートは無筋であると仮定する。無筋コンクリートでは平面保持の仮定に従った場合、曲げひび割れの発生が即ちひび割れの貫通である。貫通ひび割れの発生は、構造安定性および背面の盛土を保護する目的の二点を考慮すると致命的な損傷であると考えられる。したがって、本検討では前法面コンクリートの限界状態を曲げひび割れの発生とし、単純梁としてモデル化したコンクリート断面の引張端における引張応力がコンクリートの引張耐力に達したときを限界状態とする。このとき対象とする前法面コンクリートの破壊を表す限界状態関数は、式(5)のように与えられる。

$$g(x) = R(f_{ct}) - S(M/Z) \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 f_{ct} : コンクリートの曲げ引張耐力、 M : 荷重によりコンクリートに発生する最大モーメント、 Z : コンクリート断面係数 ($=BH^2/6$) である。以上のように得られた式(5)は、損傷確率を算定する際の性能関数となるものである。

c) 地盤の弾性係数と波力による波圧分布の算定

前法面コンクリートを支持する地盤パネの弾性係数は、式(6)に示す道路橋示方書((社)日本道路協会, 2002)にある水平地盤反力係数算定式を用いて評価する。なお、この式は基本的には杭基礎に働く地盤反力の算定のためのものであるが、平板の場合にも適用が可能である。

$$k_H = k_{H0} \left(\frac{B_H}{30} \right)^{-3/4} \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 k_H : 水平地盤反力係数 (kgf/cm^3 , $k_H \times 10^4 \text{ kN/m}^3$), k_{H0} : $1/30 \alpha E_0$, B_H : 基礎の換算載荷幅 (D/β)^{1/2}, β : 基礎の特性値 ($k_H D / (4EI)$)^{1/4}, α : 地盤反力係数推定に用いる係数, E_0 : 地盤の変形係数, EI : 基礎の曲げ剛性である。

また波による損傷は、単位時間(例えば1年)の最大の波により発生すると仮定し、波力は単位時間当たりの最大の波の波圧分布を与える。なお、波圧分布は、合田(1977)による不規則波の波圧算定式(以下、合田式)を

用いる。合田式は直立堤に働く波力の算定式であるが、傾斜が水平面に対して60°程度の角度が期待できること、また海岸であるため、水深に比べ波長が十分に長いことが考えられるため、本検討においては波力算定式として採用した。したがって、入力パラメータとしては対象構造物の位置における1年間の最大有義波高と有義波周期を与える。

3. 試算結果と考察

(1) 評価モデルの設定

堤体の諸元は、一般的な構造を想定して、高さ5(m)、平均海水面を海底面より2.5(m)、堤体傾斜200%とした。また、堤体コンクリート及び堤体盛土の諸元は、設計基準強度 $f_{ck} = 20 (\text{N/mm}^2)$ 、曲げ引張強度 $f_{ct} = f_{ck}/10$ 、部材厚500(mm)、弾性係数250,000(kN/m)、堤体盛土の N 値5、地盤弾性係数 $E_0 = 280 N = 1,400 (\text{kN/m})$ とした。また、堤体に作用する波条件は東京湾内を想定し、有義波高 $H_{1/3} = 1.3 (\text{m})$ 、有義波周期 $T_{1/3} = 6.0 (\text{s})$ とした。

マルコフ連鎖モデルによる空洞化の進展評価、及び一次ガウス近似法における損傷確率の計算では、材料特性、地盤特性、さらに波浪条件等の変数について、確率変数として評価することによって、変数のばらつきを考慮した検討を行う。試算においては、破壊の発生に影響の大きい変数として、コンクリート強度、地盤反力係数、有義波高・周期を確率変数として与え、表-1に示すように平均値と変動係数を設定した。

表-1 確率変数とその平均値・変動係数の設定

確率変数	平均値	変動係数
コンクリート設計基準強度 (N/mm^2)	20	0.1
水平地盤反力係数	—	0.2
有義波高 (m)	2.0	0.2
有義波周期 (s)	6.0	0.2

(2) 空洞化の進展と損傷確率の関係

始めに盛土の吸出し量を仮定して、一次ガウス近似法を用いて損傷確率の評価を行い、空洞化の状態と損傷確率の関係を検討した。0%から60%の間の堤体盛土の吸出し量 $x(\%)$ と損傷確率の関係を図-5に示す。図から分かるように、損傷確率は吸出し量の増加に伴って二次関数的に増大している。図中に実線で示す堤体盛土の天端が水面位置に達する吸出量50%付近では損傷確率は0.05程度になり、その後の損傷確率の増加は顕著である。したがって、空洞化の範囲が水面付近まで達すると、堤体の健全性に問題を生じることが分かる。

(3) 劣化・変状の経時変化の検討

a) 吸出し速度の設定

前項の結果から、以下の検討では空洞化の進展によって盛土の天端レベルが初期状態の40%（吸出し量60%）まで低下した時点を吸出しによる劣化進展の最終状態と仮定して、最終状態に達するまでの時間を空洞化の寿命 T (年)とした。そして、寿命の平均値 $E(T)$ は一定値として、分散 $Var(T)$ をパラメータとして変化させ、状態変化への影響を検討する。

始めに、計算を行ったケースの条件と、破壊の発生を組み込む前に求められたマルコフ連鎖モデルの状態分割数、遷移確率等の値を表-2に比較して示す。

表-2 マルコフ連鎖モデルの状態遷移確率の算定結果

ケース	平均値 $E(T)$	分散 $Var(T)$	状態分割数 b	遷移割合 r
1	40	4.44	37	0.11
2	40	10.00	33	0.25
3	40	19.26	28	0.48

検討する3ケースでは、平均寿命は40年と一定であるが、寿命の分散を5, 10, 20と与えている。表中の分散の値は、分割状態数 b を整数にするために分散の値を再計算して得られたものである。

b) 破壊確率の変化

ここでは、劣化・損傷の基本的な特性を評価するために、初期状態では欠陥がないものと仮定する。したがって、初期状態ベクトルは $A(0)=\{1, 0, 0, \dots, 0\}$ とおくことができる。

表-2のケース3の場合の供用年に対する破壊確率の変化を求め、損傷の発生を考慮しない場合と比較して図-6に示す。波力による損傷の発生を考慮しない場合は、図中に示すように、供用年が30年を経過するまでは破壊確率の値は0であり、その後急速に増大する。一方、損傷の発生を考慮した場合の破壊確率は、建設当初より30年程度の期間は一定の割合で増大し、30年を経過すると急激に大きくなる。空洞化の寿命の平均値として与え

た40年経過時では、破壊確率は損傷の発生を考慮しない場合が0.5であるのに比べて、考慮した場合は0.8程度にまで達している。さらに供用期間が50年に近づくと、破壊確率は概ね1.0となっている。以上のように、この計算条件では波力による損傷の発生を考慮した場合としない場合では、供用年に伴う対象構造物の破壊確率の進展状況には大きな差異が見られた。

上記のように、損傷の発生を考慮した場合は建設当初から破壊確率が一定の割合で増大しているが、これは損傷の発生による破壊に対する影響が大きいことを示す。一方、損傷を考慮した場合の30年を経過したところから見られる破壊確率の急激な増大は、損傷を考慮しない場合に破壊確率の増大が開始する時期とほぼ一致している。つまり、この急激な破壊確率の増大は吸出しによる劣化の影響によると考えられる。つまり、防潮堤の破壊確率については、本研究の例では次の2点を考えることができる。

- ・30年を経過するまでは波力による損傷の影響が支配的である。
- ・30年を経過すると、劣化事象（堤体盛土吸出し量の限界に到達）の影響が増大する。

本検討結果では、破壊確率が0.1に到達する年数が、損傷を考慮した場合で10年程度、考慮しない場合で35年程度と非常に大きな差異が見られ、損傷の発生は主に初期段階における破壊確率に大きな影響を与えることが分かる。得られた結果から、損傷の発生を考慮した劣化評価の重要性を確認することができる。

c) 劣化・変状の確率分布の変化

経過年に伴う状態ベクトルの変化を図-7に示す。この図は10年後から50年後までの10年ごとの状態の確率密度関数をヒストグラムとして表したものである。グラフ横軸線上は経過年ごとにステップの進展を示しており、軸線上の黒丸が初期状態、白丸が最終状態（破壊状態）である。10年後から30年後までの状態ベクトルでは、連続的な状態変化の部分と破壊に到達した要素は離れており、劣化が構造物に与える影響と損傷の発生の影

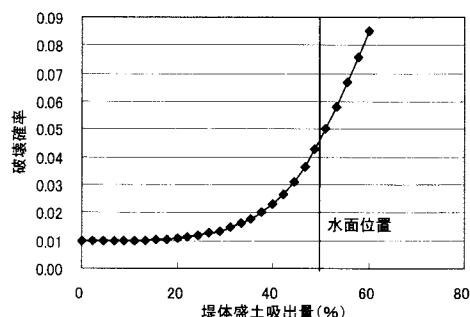


図-5 堤体盛土吸出し量と破壊確率の関係

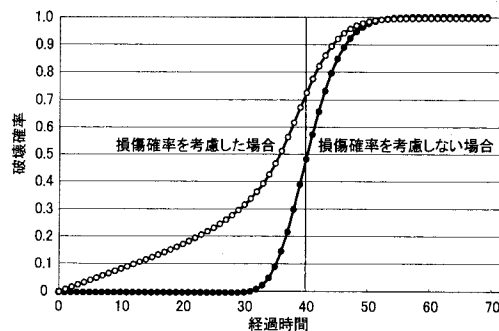


図-6 経過時間と破壊確率の関係

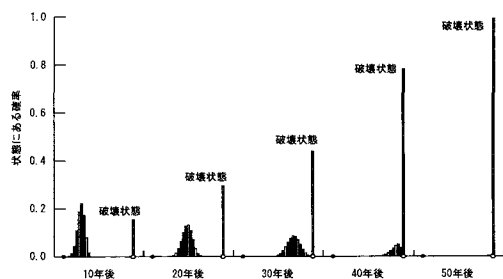


図-7 10年ごとの状態ベクトルグラフ

響は独立している。一方、40年後の結果では劣化によるステップの進展が最終状態にまで到達しており、この時点では構造物の破壊確率は劣化による破壊確率と損傷による破壊確率、すなわち損傷確率が互いに作用したものになっている。この結果、図-6に示したように、破壊確率は、30年を過ぎた時期から急激に増大したと考えることが出来る。

d) 平均寿命のばらつきの影響

表-2に示した3ケースの破壊確率の変化を比較し、寿命のばらつきによる影響を検討する。3ケース及び損傷を考慮に入れない場合の破壊確率グラフを図-8に示す。破壊確率が約0.75に到達する経過時間は、分散の値にかかわらず40年である。これは損傷を考慮しない場合に破壊確率が0.5に達する時間と同じ時間である。供用開始から30年程度は破壊確率のほとんどが損傷の影響によるため、分散が異なっても平均値が同じであれば破壊確率に違いは出ない。損傷確率を考慮しない場合に破壊確率が急増する経過時間と、損傷を考慮した場合の分散が異なるケース間で違いが開始する経過時間はほぼ一致しており、劣化による影響が大きくなると、寿命の分散の影響も大きくなることが確認できる。

4. ま と め

本検討では、三面張防潮堤の吸出しによる劣化・変状評価に対してマルコフ連鎖モデルを適用し、波力による損傷事象の発生を考慮した劣化進展の評価システムを構築した。そして、波力と材料・強度特性のばらつきや波による損傷の発生が劣化・変状の進展特性に与える影響について検討を行った。吸出しによる空洞化の進展が波

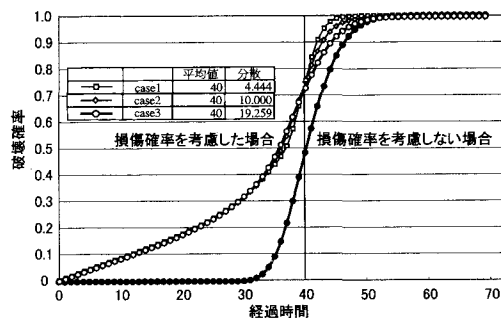


図-8 平均寿命のばらつきの影響

による損傷の発生に及ぼす影響は大きく、堤体盛土の天端レベルが水面位置にまで達すると破壊確率は著しく大きくなる。その結果、波による損傷の発生を考慮すると、劣化による破壊確率は供用年が短い期間から増大し、損傷の発生を考慮しない場合の変化と大きな差異を生じる。また本論文の検討条件では、供用年が30年程度までは波による損傷の発生の影響が顕著であり、その後劣化の影響が増加することが分かった。

今後は波浪条件や材料特性に関してさらに検討を行うとともに、劣化・変状に与える影響について考察を行う。また、対象構造物の劣化・変状に関する点検・調査データや既往の研究成果を収集し、寿命や遷移確率の見直しを行うことにより、実構造物の劣化・変状評価に有効な評価システムを構築していく。

参 考 文 献

- 氏家久芳・佐々木明・稲田 裕・鈴木 誠 (1992): 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. 38, pp. 1071-1075.
- 合田良実 (1977): 港湾構造物の耐波設計, 鹿島出版会, 333 p.
- 日本道路協会編 (2002): 道路橋示方書・同解説 (下部工編), 556 p.
- 藤本由起夫・出口章生・岩田光正 (1989): 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, pp. 303-314.
- 堀口孝男・中道峰夫 (1976): 多孔壁式防波堤の消波機能と波力, 第23回海講論文集, pp. 89-94.
- 山田浩次・田辺勇人・鳥居謙一・加藤史訓・山本吉道・有村盾一・Vu Thanh Ca (2001): 海岸構造物周辺の洗掘の定量的評価, 海岸工学論文集, Vol. 48, pp. 551-555.
- Bogdanoff, J. L., F. Kozin (1985): Probabilistic Models of Cumulative damage, Jo Wiley & Sons, New York, 341 p.