

マルコフ連鎖モデルによる海岸保全施設の劣化・変状遷移 評価システムの開発と適用

稲田 裕*・横田 弘**・関根好幸***・辻岡信也****

著者らは、コンクリート被覆堤を対象として、確率統計的な解析手法に基づく劣化・変状評価に関する研究を継続的に行っている。そして、状態の遷移と損傷の発生を考慮したマルコフ連鎖モデルの適用を図り、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損傷の発生を評価できる解析システムを開発し、試計算によってその有効性を示してきた。本検討では、波浪条件の設定や構造モデルについて更新・改良を行うことにより、評価システムの実用化を図る。さらに実構造物を想定したケーススタディによって、対象構造物の状態変化の特徴や波浪・構造特性等の条件が劣化・変状の進展に与える影響について検討を行った。

1. はじめに

近年、日本では道路・鉄道構造物等の社会基盤構造物の老朽化とそれによる被害の発生が社会的な問題となってきた。海岸施設にも老朽化が進んだものも見られるようになっており、点検・補修等の適切な維持保全の必要性が広く認識されつつある。特に、防波堤、防潮堤のような海岸保全施設の損傷の発生は大きな人的・物的な被害に繋がる可能性を有するため、その健全性の維持は重要な課題である。被災のメカニズムの究明や復旧対策の検討とともに、海岸保全施設の状態の評価手法や劣化・損傷の検知技術の迅速な開発が強く求められている。そこで著者らは、海岸保全施設の劣化・変状の遷移を評価するための解析手法の開発に関する研究を継続的に進めている。特に、コンクリート被覆堤を対象として、確率統計的な手法に基づき劣化・変状の遷移を評価するための解析モデルの構築を図ってきた。これまでの研究では、堤体盛土の吸出しによる空洞化の進展と、波浪による堤体の前法面コンクリートの損傷の発生に着目した劣化・変状評価に関する検討を行った。そして、劣化による状態の遷移とともに損傷事象の発生を考慮したマルコフ連鎖モデルにより状態変化を表し、損傷の生起確率を信頼性評価により求める評価システムを開発し、試計算によって開発した評価システムの有効性の確認を行った(辻岡ら, 2004)。本検討では、開発した評価手法についてさらに検討を進め、実構造物に有効な評価システムの構築を図る。そして、実構造物を想定したケーススタディを行うことにより、波力や地盤・構造特性等が劣化・変状に与える影響について検討する。

2. コンクリート被覆堤の劣化・変状評価手法

(1) 劣化・変状評価の考え方

コンクリート被覆堤の劣化・変状としては幾つかのパターンが考えられるが、その中で顕著な劣化・変状としては盛土材の吸出しによる空洞化の進展と波力による堤体コンクリートの損傷の発生が挙げられる(安間・石渡, 1986)。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(この状態を本検討では「破壊」と表現する)。また、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を受け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(本検討ではこれを「損傷」と表現する)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の発生を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。

これまでの研究から、マルコフ連鎖モデルに基づく評価手法によって、空洞化の進展による劣化と損傷の発生をともに考慮した解析が可能であることが確認できた。また、損傷の発生には波浪条件の影響が大きく、対象構造物の波浪条件を適切に表した評価が重要であることが明らかとなった。本検討では波力や構造条件に関してより正確な評価を行うこととして、波浪条件の設定と破壊確率の評価手法について改良・更新を図る。特に波浪条件の設定では、実際の評価地点を設定し、極値統計解析により最大波高分布を推定し、損傷確率の算定に用いる。

(2) 評価システムの概要

a) 劣化・変状評価モデル

本検討では、空洞化の進展と損傷の発生を図-1に示すような2次元モデルを用いて評価する。昨年度の検討

* 正会員 工博 (株)大崎総合研究所

** フェロー 工博 (独法)港湾空港技術研究所 構造強度研究室

*** 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 京都大学大学院法学研究科 法曹養成専攻

では、前法面コンクリートの頂部から海底面までの間のみを切り出し、最も単純な両端ピン支持の梁部材としてモデル化した。本検討では、図に示すように根入れ部や堤頂部の影響を評価できるような構造モデルに変更し、境界条件を実状に即したものに修正している。また法面勾配の影響も考慮できるように変更を行い、後述するように異なる法面勾配の堤体について比較を行う。空洞化の進展は簡単のため、図に示すように盛土天端レベルが水平を保ちながら一定速度で低下していくものとする。そして空洞化の進展の影響は、空洞化部分の地盤ばねを取り外すことによって表す。

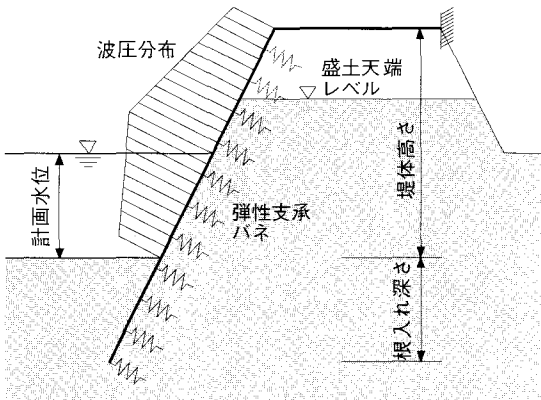


図-1 空洞化の進展と損傷発生の評価モデル

b) 損傷発生を考慮したマルコフ連鎖モデル

対象構造物の劣化・変状は、図-2に示すようなマルコフ連鎖モデルに基づき評価を行う。これは次の状態への状態変化のみを考慮した Unit Step B-model に、各状態において損傷の発生により破壊に至る変状を組み込んだものである (Bogdanoff・Kozin, 1985; 藤本ら, 1989)。図中に示すように状態の推移を b 個のステップに分割し、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を $r_i = p_i/q_i$ (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) とおく。そして状態の遷移速度を一定と考え r_i を一定値 r とおき、状態 i において破壊に達する確率を S_i として与えると、次式のような関係が得られる。

$$p_i = r(1 - S_i)/(1 + r), \quad q_i = (1 - S_i)/(1 + r) \quad (1)$$

ある時間ステップ n における状態を、状態ベクトル $A(n) = \{a_1(n), a_2(n), \dots, a_b(n), a_{b+1}(n)\}$ として表すと、 $A(n)$ は次式により求められる。

$$A(n) = A(0) \cdot P^n \quad (2)$$

ここで、 $A(0)$ は初期時間における状態ベクトル、 P は次式で表される遷移確率行列である。

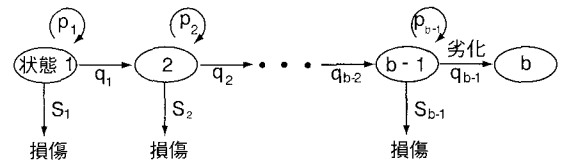


図-2 損傷の発生を組み込んだマルコフ連鎖モデル

$$P = \begin{bmatrix} p_1 & q_1 & & & & S_1 \\ & p_2 & q_2 & & & S_2 \\ & & \ddots & \ddots & & \vdots \\ & & & p_i & q_i & S_i \\ & & & & \ddots & \vdots \\ & & & & & p_{n-1} & q_{n-1} & S_{n-1} \\ 0 & & & & & & 1 \\ & & & & & & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

さらに n 年後に状態の遷移あるいは損傷の発生によって最終状態に達する確率を破壊確率 $P_f(n)$ と定義すると、その値は次式のように状態ベクトルの最終要素で表すことができる。

$$P_f(n) = a_{b+1}(n) \quad (4)$$

c) 損傷の生起確率の評価

波によって堤体に損傷が発生する確率は、1年間の最大の波による損傷の生起確率として評価する。このような構造物の安全性・信頼性の評価では、作用外力の極大値の分布を考慮することが重要となる。そこで、本検討では極値統計解析によって年最大の波高の確率分布を求め、極値分布を用いた信頼性評価により損傷の生起確率の算定を行うこととする。

損傷の生起確率は、信頼性評価に基づき一次ガウス近似法を用いて算定する。前法面は無筋コンクリートであり、かつ断面は平面保持の原則に従うと仮定し、貫通ひび割れの発生を損傷の発生として評価する。したがって、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て、曲げひび割れが発生したときが限界状態となる。この時、法面コンクリートの損傷を表す限界状態関数は次式のようになる。

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

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である。

なお、コンクリートを支持する地盤バネの弾性係数は、次式のような道路橋示方書 ((社)日本道路協会, 2002) の水平地盤反力係数算定式を用いて評価する。

$$k_H = k_{H0}(B_H/0.3)^{-3/4} \quad (6)$$

ここで、 k_H は水平地盤反力係数 (kN/m^3), k_{H0} は $(1/0.3)$

αE_0 , B_H は基礎の換算載荷幅($= (D/\beta)^{1/2}$ (m)), D は杭の外径(m), β は基礎の特性値($= \{k_H D / (4EI)\}^{1/4}$ (m)), α は地盤反力係数推定に用いる係数($=1$), E_0 は地盤の変形係数, E_I は基礎の曲げ剛性である。

3. 試算結果と考察

(1) 対象地点と波浪条件及び計算条件の設定

a) 対象地点と波浪条件の設定

実際の波浪統計解析では、対象地点での波浪観測データから極値資料を作成し、極値分布へのあてはめを行う。本検討では、日本全国の海象条件を統一的に整理・検討した資料として、高田ら(2003)による調査結果に基づいて波浪条件を設定した。防潮堤の想定位置としては、上記資料中に波浪データが与えられた地点から東京湾内の三浦半島周辺の三地点を選択した。与えられた各地点の10年、50年の確率波の算定結果を基に、対象地点の波高が最も高くなる波向きの沖波について年最大波高の確率分布関数を推定する。なお分布関数の分布型は、次式に示すワイブル分布を用いた。

$$F(x) = 1 - \exp \left[- \exp \left(- \frac{x-B}{A} \right)^k \right] : B \leq x < \infty$$

.....(7)

ここで x は極値を表す確率変量, $F(x)$ は x の確率分布関数であり、定数 A , B 及び k は分布形を表す尺度母数, 位置母数, 形状母数である。

形状母数を $k=1$ として、確率波の再現期間から非超過確率を算定して、母数の推定を行った。各地点の確率波と求められたワイブル分布の母数を表-1に示す。

表-1 沖波の年最大波高分布の推定結果

評価地点	沖波データ		母数の推定結果		
	再現期間	波高(m)	k	A	B
A	10	1.87	1	0.26	1.27
	50	2.29			
B	10	3.50	1	0.62	2.07
	50	4.50			
C	10	7.49	1	0.63	6.05
	50	8.50			

損傷の生起確率を算定するための堤体前面での波高分布は、表-1に示した沖波の波高分布に対して、上記資料に示された各地点ごとの沿岸係数(=屈折係数×回折係数)と浅海係数を乗じて算定した。再現期間50年の沖波波高から同じように求められる各防潮堤位置における設計波高は、それぞれ2.1m, 2.5m, 3.3mであり、C地点における波浪条件が他の2点に比べて厳しくなっている。

さらに堤体前面の波圧分布は、合田(1997)による不

規則波の波圧算定式(以下、合田式)により求めた。合田式は本来、直立堤に作用する波力を算定するための式であり、勾配の緩い防潮堤への適用には考慮を要する。しかし、水深に比べて波長が長いこと、また富田ら(2003)によるフラップゲートの起伏角の波力に与える影響の検討において、岸側に傾斜したゲートに作用する波力が合田式により算定が可能という結果が示されていること等を考慮して、本検討では合田式により波力を算定した。なお、入力波の周期は再現期間50年の沖波周期とした。

b) 構造体・地盤条件の設定

評価対象構造物は一般的な堤体の仕様を想定し、図-1に示した堤体高さを5m, 根入れ深さを2.5m, 計画水位を2.5mとした。また、堤体前面面の勾配を2:1と1:1の2種類とした損傷確率算定用の構造解析モデルを作成した。また、堤体コンクリートは設計基準強度20 N/mm², 部材厚500mm, 弾性係数25 kN/mm², 堤体盛土のN値は5として、地盤弾性係数 E_0 は14,000 kN/m²(=2,800 N)とする。

損傷の生起確率の評価では、コンクリート強度、地盤反力係数、沖波有義波高の3個の変数を確率変数として与え、変数のばらつきを考慮した検討を行う。沖波有義波高は、前項に示すようにワイブル分布で与える。コンクリート強度と地盤反力係数は正規分布に従うものと仮定し、平均値を上記の値として、変動係数をそれぞれ0.1, 0.2とした。

(2) 空洞化の進展に伴う損傷確率の変化

評価モデル断面の初期状態における全盛土量に対する吸出しによる盛土の減少量の比を吸出量(%)と定義して、空洞化の状態を吸出量の変化により表すものとする。設定した3地点について、一次ガウス近似法により求められた損傷確率の吸出量に対する変化を図-3に示す。損傷の発生は波浪条件の影響が大きく、波高の小さいA, Bの二地点の損傷の生起確率は非常に小さい。一方、波浪条件の厳しいC地点については吸出量に伴う損傷

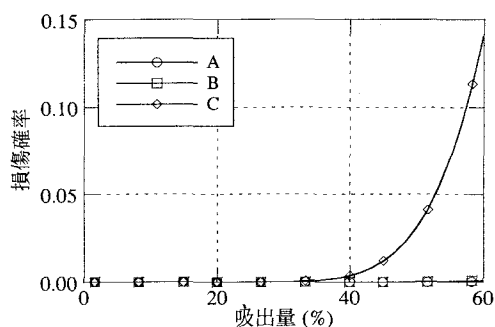


図-3 盛土の吸出量に対する損傷確率の変化

確率の増大が顕著に見られる。吸出量が30%程度から損傷確率の増加が生じ、盛土の天端が水面位置に相当する吸出量50%では損傷確率は3%を超えている。

A, B の二地点における結果はC地点に比べると確率の絶対値は非常に小さいが、吸出量に対する損傷確率の増加傾向はC地点と類似している。

信頼性評価による損傷確率の算定では、求められる信頼性指標 β の方向余弦 α を感度係数として、各々の確率変数の損傷の発生に対する影響度を評価することができる。損傷の進展が顕著に見られたC地点を例として、確率変数として与えた3つの変数について、吸出量に対する各変数の感度係数の変化を図-4に示す。吸出量が10%以下と小さいときは、地盤反力係数の感度係数が大きく、他の2つの確率変数の感度係数は小さい。吸出しが15%程度となると、波高とコンクリート強度の感度係数の値が増大している。特に波高の感度係数は-0.95程度と絶対値が著しく増加し、堤体の損傷が発生する状態では波高の大きさとそのばらつきを適切に評価する必要がある。

堤体前法面の勾配を1:1と2:1とした場合について、吸出量と損傷確率の関係を図-5に比較する。なお上と同様に、評価地点はC地点としている。どちらの法面勾配の場合も、吸出量が30%程度の範囲までは損傷確率が小さいため、二つの結果にはほとんど差は見られ

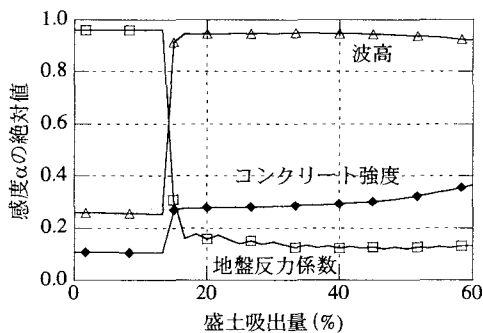


図-4 確率変数の影響度評価結果

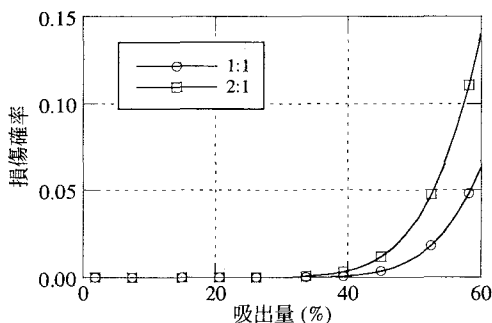


図-5 法面勾配の損傷確率への影響

ない。しかし、吸出量が30%を超え損傷確率が有意な値となると、二つの法面勾配での損傷確率の変動には差異が生じ、勾配の緩やかな勾配1:1の損傷確率の値がやや小さくなる。得られた結果から、堤体前面コンクリートの損傷の発生には堤体法面の勾配が大きく影響するため、勾配による損傷確率の変化を考慮して劣化・変状を評価することが重要であることが分かった。

(3) 破壊確率の経時変化の検討

次に、供用期間の経過に伴う堤体の破壊確率の変動特性と劣化・変状の状態変化について検討を行う。前項における検討結果から、空洞化の進展によって盛土の天端レベルが静水面まで低下すると損傷の生起確率が著しく増大することが明らかとなった。そこで本検討では、盛土の天端レベルが静水面に達した時点空洞化の進展による破壊状態と考える。そして、破壊状態に達するまでの時間を空洞化による劣化の寿命 T (年) と定義する。さらに、寿命 T を確率変数として、平均値 $E(T)$ と分散 $\text{Var}(T)$ をパラメータとして設定し、寿命とそのばらつきによる状態変化の検討を行った。なお簡単のため、建設時における初期損傷はないものと仮定して、初期状態ベクトルは $A(0) = [1, 0, \dots, 0]$ として与えた。

空洞化による劣化の寿命の平均値を40年、分散を10とした場合について、3地点での経過年数に対する破壊確率の変化を図-6に示す。なお、勾配は2:1としている。図-3に示したように、波浪条件が厳しく損傷の生起確率が高いC地点と他の二点との結果には差異が見られ、波による損傷の発生を考慮した評価が重要であることが明らかである。波浪条件が比較的穏やかなA, Bの二地点の結果はほとんど一致しており、波による堤体の損傷の発生が破壊確率に与える影響は小さいことが分かる。一方、C地点では比較的早い経過年数の期間から、損傷発生の影響により破壊確率の値の増大が始まっている。そして経過年数が40年に達すると、空洞化による劣化の進展と損傷の発生の相乗的な効果によって破壊確率は60%を超えている。波浪条件が厳しい場合には、

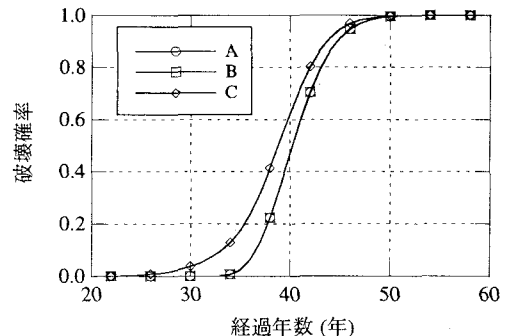


図-6 経過年数に対する破壊確率の変化

波による堤体の損傷の発生を十分に考慮した上で、堤体の健全性の評価を行う必要があることが分かった。

次に、経過年数10年ごとの状態ベクトルの頻度分布を求め、図-7にヒストグラムとして比較して示す。横軸は各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。供用年数が20年までは破壊状態の要素はほとんど見られず、劣化の進展による状態変化のみが観察されている。また、劣化の進展速度のばらつきにより、状態の分布の幅が徐々に拡大していることが分かる。経過年数が30年に達すると、破壊状態を表す要素の増加が顕著に見られるようになっていく。これは、損傷の発生によって破壊状態に至る要素の割合が有意になったことを示している。経過年数が40年の結果では、劣化の進展と損傷の発生確率の増大が相互に影響を及ぼし、破壊状態の割合が急増していることが分かる。

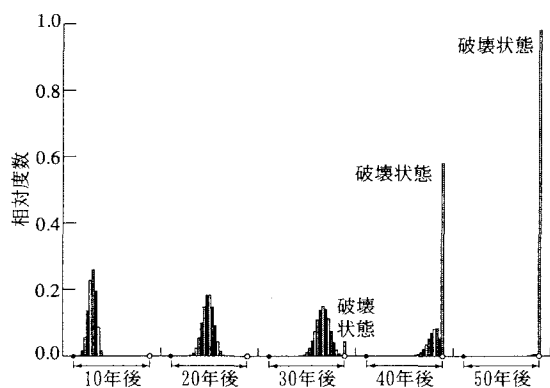


図-7 経過年数に伴う状態ベクトルの変化

以上の検討結果から、本評価システムを用いることによって、供用期間の進展に伴う破壊確率の変化とともに、任意の時期における構造物の劣化・変状の状態変化を明確に示すことができることが確認できた。

4. ま と め

本検討では、コンクリート被覆堤を対象とした劣化・変状の評価として、堤体盛土の吸出しによる空洞化の進展と波による堤体前面のコンクリートの損傷の発生に着

目し、状態の遷移とともに損傷の発生を考慮したマルコフ連鎖モデルの適用を図った。そして、防潮堤の設置位置を想定したケーススタディを行い、対象構造物の劣化・変状を適切に評価できることを明らかにした。また、波浪条件が厳しい場合は空洞化の進展による損傷の生起確率の増大が顕著であり、供用期間が長くなり空洞化が進むと、劣化と損傷発生の影響が重なり合い破壊確率が急速に増大することが分かった。開発した劣化・変状評価システムの適用により、損傷の発生と劣化の進展が相互に影響した状態において、供用期間に伴う破壊に至る確率や状態の変化を容易に推定することが可能であることが明らかとなった。

なお、本検討は評価システムの構築と現象評価を主な目的とし、外力や劣化の進展状況については幾つかの仮定に基づき計算を行っている。今後、各種の調査結果や研究成果を取り入れることにより、開発した評価システムの実用上の有効性の向上を図ることが可能となると考えられる。また検査による変状、損傷の検知や補修による状態変化を取り込むことにより、対象構造物の維持管理の立案への適用を図ることが可能になると考えられるため、維持管理に係わるデータの収集とモデル化も今後の課題である。

参 考 文 献

- 安間清・石渡友夫(1986)：海岸保全施設の維持管理手法，港湾技研資料，No. 557, 52p.
- 合田良実(1977)：港湾構造物の耐波設計，鹿島出版会，333p.
- 高田悦子・諸星一信・平石哲也・永井紀彦・竹村慎治(2003)：我が国沿岸の波浪外力の分布（海象外力検討調査），国総研資料，No. 88, 132p.
- 辻岡信也・横田弘・関根好幸・稲田裕(2004)：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，海岸工学論文集，第51巻，pp. 1331-1335.
- 富田孝史・下迫健一郎・山田昌郎・横田弘(2003)：大規模可動式高潮防潮堤に関する基礎的研究－フラップゲートの水理特性と試設計，港湾空港技研資料，No. 1060, 31p.
- 日本道路協会(2002)：道路橋示方書・同解説Ⅳ下部構造編，256p.
- 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.
- Bogdanoff, J. L., F. Kozin(1985): Probabilistic Models of Cumulative damage, John Wiley & Sons, New York, 341p.