

海岸保全施設の老朽化実態とその進行モデルの構築

横田 弘*・岩波光保**・関根好幸***

長期にわたる供用を経た海岸保全施設の状態を定量的に評価し、老朽化の進行に伴う機能・性能の低下を精度よく予測することが、施設の機能維持やストックの有効活用の点から必要である。本論文では、まず三面張り式防潮堤および消波ブロック被覆ケーソン式護岸の老朽化実態の調査事例を紹介した。これらの調査から得られた施設の性能低下の進行程度を、確率論的アプローチであるマルコフ連鎖の手法を取り入れてモデル化することを試みた。その結果、マルコフ連鎖に基づく変状進行モデルは、性能低下の実態を再現する手法として十分適用できることがわかった。

1. はじめに

今日、社会基盤施設の機能評価、長寿命化や延命化による有効活用およびライフサイクルコストの縮減などを目的とするマネジメントシステムの構築が緊急に求められている。我が国では、戦後の高潮・津波災害を契機として多くの海岸保全施設が整備されてきている。これらの施設の中には、長期にわたる供用を経て、著しく老朽化した施設も認められるようになり、防災施設としての機能低下が懸念されている。高潮・津波などの自然災害から国土を守り、安全な国民生活を保証するためには、老朽化した海岸保全施設の防災施設としての残存機能を定量的に評価し、適切な維持・補修を実施していかなければならない。

これまで、海岸保全施設はその新規建設・整備に重きが置かれ、既に整備された施設の維持管理や延命化等については十分な取組みが行われてこなかったと言える。これは、海岸保全施設の延長が長く、点検・診断が容易でないことや、変状の発生機構が複雑であるため、老朽化による機能低下メカニズムが十分に解明されておらず、施設の状態を評価し、将来の機能低下を予測することが容易でないことなどによる。

そこで本研究は、効率的な維持管理の基幹となるマネジメントシステムの構築に必要な海岸保全施設の老朽化に伴う安全性能低下モデルを構築することを目的として実施した。ここでは、代表的な海岸保全施設である三面張り式防潮堤と消波ブロック被覆ケーソン式護岸を対象として、老朽化実態を把握するための現地調査を行った。その結果に基づき、老朽化の進行過程に関する確率論的なアプローチに基づく変状の進行予測モデルを構築し、その適用性を考察した。

2. 海岸保全施設の老朽化事例

海岸保全施設の残存機能を的確に評価するためには、

まず老朽化による劣化や変状の実態を把握することが重要である。そこで、三面張り式防潮堤および消波ブロック被覆ケーソン式護岸を対象に老朽化実態を調査した。

(1) 三面張り式防潮堤

a) 調査方法

対象とした三面張り式防潮堤は、盛土材や栗石により築かれた堤体を、コンクリート製の表のり、水叩きおよび裏のりで被覆したものであり、表のり部には波返し工（パラペット）が設置されている。図-1に、対象施設の標準断面図を示す。この施設は、建設後約40年が経過しており、コンクリートのひび割れや吸出しによる堤体の空洞化などの変状が局所的に認められている。

施設延長の長い防潮堤の老朽度を調査するには、その簡便性および迅速性から、踏査による目視観察によることが望ましい。そこで本調査においても、劣化や変状の種類、程度、位置および範囲を目視により確認した。特に、コンクリートのひび割れ、目地の開き・ずれ、目地材の劣化、水叩き部の傾斜・すり減り、吸出しによる堤体の空洞化に着目した。

また、使用されたコンクリートの材料劣化を調べるため、パラペット部から採取したコアを用いて、圧縮強度、塩化物イオン含有量、中性化深さなどを計測した。

b) 調査結果

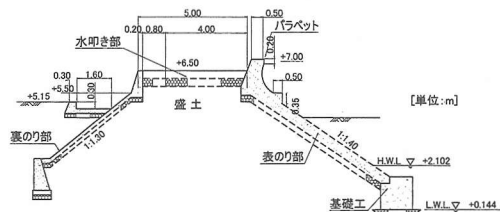
目視調査の結果、写真-1に示すように、目地の開きやずれが顕著である目地が全目地箇所の10~20%で発見された。この位置で表面コンクリートを撤去したところ、目視により変状が認められた位置で吸出しによる局所的な空洞が生じていた。また、水叩き部の法線平行方向に長いひび割れが生じた地点では、地盤沈下起因すると推測される広範囲にわたる空洞が生じていた。吸出しや地盤沈下による堤体の空洞化は、防潮堤全体の安定性や外力に対する抵抗性を損ねる可能性があるにもかかわらず、外観の目視観察では直接的に捉えることができない。しかし、目地部の変状といった空洞化の発生を示唆する変状を的確に捉えることで、空洞化の発生状況のある程度評価できると考えられる。

パラペットを含む表のり部および裏のり部には、コン

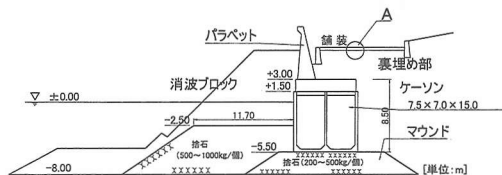
* フェロー 博(工) (独法) 港湾空港技術研究所構造強度研究室長

** 正会員 博(工) (独法) 港湾空港技術研究所主任研究官

*** (独法) 港湾空港技術研究所構造強度研究室



図一 三面張り式防潮堤の標準断面



図二 消波ブロック被覆ケーソン式護岸の標準断面

クリートの乾燥収縮によるひび割れが若干発生していたものの、顕著な変状は見られなかった。パラペットより採取したコアを用いてコンクリートの圧縮強度を計測した結果、その平均値は 13.1 MPa となった、また、表面から 10 mm の位置でのコンクリート 1 m³中の塩化物イオン含有量は 0.2~0.9 kg/m³、中性化深さは 20~35 mm であった。これらより、この防潮堤に用いられたコンクリートの強度特性や物質浸透抵抗性は十分でない可能性が高いと評価される。

(2) 消波ブロック被覆ケーソン式護岸

a) 調査方法

消波ブロック被覆ケーソン式護岸では、ケーソンの背後および上部を土砂や栗石で裏埋めし、護岸前面を消波ブロックで被覆している。さらに、ケーソン上部には波返し工（パラペット）が設置され、水叩き部はアスファルトで舗装されている。対象施設の標準断面図を図一に示す。この施設は、建設後約 25 年が経過している。

まず、施設全長にわたって施設外観に現れた変状などを目視により調査した。この際、舗装の陥没穴や沈下、アスファルトのひび割れ、越波の状況などに着目した。さらに、陥没穴が発生していた地点において、電磁波レーダ法による空洞探査を行った。電磁波レーダ法は、アンテナ部より物体中に送信された電磁波が、物体内の欠陥や裏面などで反射し、その反射波形の特徴から欠陥の状態などの物体内部の情報を得る非破壊試験技術である（日本コンクリート工学協会, 2001）。これにより、アスファルト舗装下における空洞化の状況を非破壊的に推定できる。あわせて、陥没穴が発生していない地点においても本方法を適用し、舗装下の状況を調べた。

b) 調査結果

調査の結果、水叩き部のアスファルト舗装に、写真一



写真一 目地部における変状



写真二 アスファルト舗装の陥没

に示すような陥没穴が生じていた。現在でも陥没穴の発生は収まっておらず、年間十数個の陥没穴が発見されている。陥没穴の発生位置は、裏埋め部とケーソン部の境界付近（図二の A 地点）のうち、隣り合うケーソン間に集中していた。これは、隣り合うケーソン間のすき間から裏埋め砂が吸い出された結果、アスファルト舗装下に空洞が発生し、舗装がその自重に耐えられずに陥没したためと考えられる。また、この陥没穴は施設全長にわたって発生していたのではなく、消波ブロックが沈下し、消波効果が十分でなかった範囲のみで発見された。このような箇所では、結果的にケーソンに作用する波力が大きくなり、ケーソン間のすき間において水圧が局所的に増大したことで、防砂板が損傷を受けて裏埋め砂が流出したと考えられる。また、護岸前面に離岸堤が整備された箇所では、陥没穴の発生はほとんど見られなかった。これは、離岸堤の存在によりケーソンに作用する波力が低減されたためと考えられる。

陥没穴が発生していた箇所の周囲には、多くの補修跡が認められた。ひとたび陥没穴が発生すると、同一箇所でも何度も陥没が発生しており、対症療法的な補修方法は陥没の原因に対して抜本的な対策となり得ないことを示している。これより、何らかの原因により裏埋め砂の吸出し経路が形成されてしまうと、吸出しによる空洞化を食い止めることは難しいと言える。

続いて行った電磁波レーダ計測結果の一例を図三に

表-1 空洞探査の判断基準

凡 例	推 定 結 果
○	空洞が存在しない可能性が高い
△	空洞が存在する可能性を否定できない
×	空洞が存在する可能性が高い

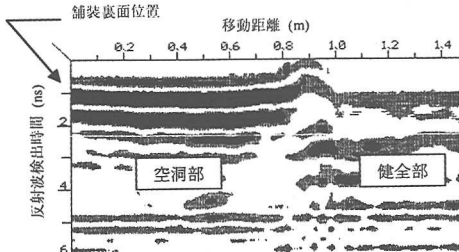


図-3 電磁波レーダ計測結果の一例

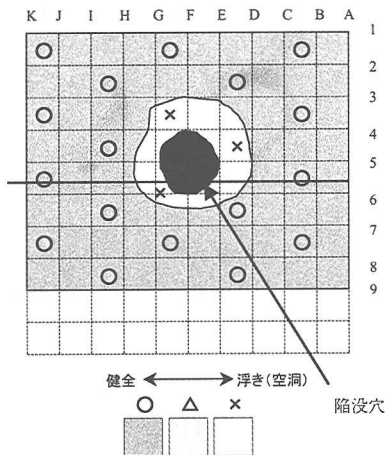


図-4 陥没穴近傍における空洞探査結果

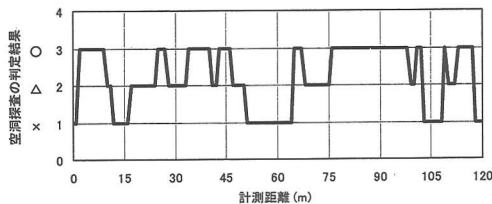


図-5 護岸法線平行方向に対する空洞探査結果

示す。この結果を、表-1に示す判断基準に基づいて分析した。また、陥没穴近傍における空洞発生状況を電磁波レーダ法により推定した結果を図-4に示す。これによれば、陥没穴の周辺に空洞が広がっている様子が視覚的に理解できる。これより、アスファルト舗装下の空洞探査に電磁波レーダ法が有効であることが示された。

護岸法線平行方向に電磁波レーダ法を適用して、アスファルト舗装下における空洞発生状況を線的に推定し

た。計測は、裏埋め部とケーソン部の境界線上で行い、120 mにわたって連続的に空洞探査を試みた。その結果を図-5に示す。これによれば、ケーソン幅と等しい15 mごとに空洞の発生が示唆されており、前述の空洞化の原因推定が妥当であったことが確認できる。電磁波レーダ計測を行った3ヶ月後に再び現地調査を行ったところ、図-5の0 mおよび120 mの位置で陥没穴が発生していた。

3. 変状進行予測モデルの構築

(1) 海岸保全施設の変状傾向

安間・石渡(1986)は、海岸保全施設の一般的な劣化・変状の状態を表-2のように5段階のレベルに区分した。また、これに基づき、代表的な海岸保全施設の変状連鎖も示した。ここでは、調査対象とした施設と構造様式が類似しているコンクリート被覆式傾斜型護岸の変状連鎖を参考として、前述の現地調査結果をふまえ、図-6を提案する。同図は、劣化・変状が発生する部位とその進行過程の異なる洗掘、波力、越波、コンクリート劣化、沈下による変状進行パターンを、表-2の劣化・変状レベルにあてはめて整理したものである。

前述の目視観察による外観調査の結果、防潮堤の変状は、コンクリートのひび割れ、目地の段差、目地幅の拡大という形態で現れ、水叩き直下に、盛土材の吸出しに起因する空洞が発生している可能性を示していた。ただし、コンクリートのひび割れから吸出しが生じた形跡はなく、この変状は現状では単独で進行してきたものと言える。

三面張り式防潮堤やケーソン式護岸の場合、盛土材や裏埋め材の流出による空洞化が引き起こす構造体としての安定性低下と外力に対する抵抗性低下が、施設の機能に大きな影響を及ぼす(土木学会, 2000)。そこで、天端や裏のり工の破壊・陥没が生じるまでを維持管理の観点での管理限界と考え、空洞化の進展が最終状態に達するまでの劣化・変状遷移の評価方法を検討した。また、コンクリートのひび割れの進行過程については、港湾構造物と海岸保全施設でほぼ同等であると考え、港湾のケーソン式岸壁で得られた調査結果(横田・小牟禮, 2002)も取り入れて検討した。

(2) マルコフ連鎖モデルの適用

劣化・変状の進行予測モデルには、マルコフ連鎖モデルを適用した。その適用に際して、以下の条件を仮定した(Yokota・Komure, 2003)。①構造物の変状レベルはI〜Vのいずれかにあり、1計算ステップ後に遷移確率 p_i で次のレベルへと変状が進行し、確率 $1-p_i$ で現在の変状レベルに留まる。②構造物の変状レベルはIから始まり、最終段階はVである。ただし、今回の事例ではVに

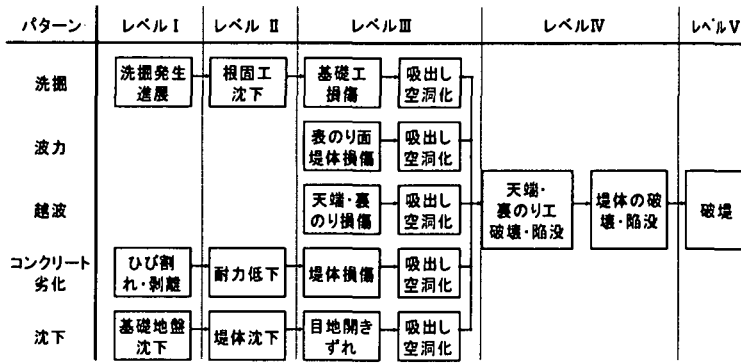


図-6 対象施設(防潮堤・護岸)の劣化・変状の進展とそのレベル区分

表-2 劣化・変状レベルの分類例

レベル	劣化・変状の状態
I	施設は健全な状態にあるか、あるいはごく微細な劣化・変状であって、まったく修復の必要のない段階
II	多少の劣化や軽度の損傷等の変状がみられるが、施設の安定性の低下は少なく、機能の低下はない段階
III	変状が拡大進行し、構造物の安定性低下、多少の機能性低下が認められる段階
IV	変状が大きく、構造物の安定性および機能がかなり低下した段階
V	施設が破壊され、機能が停止した段階

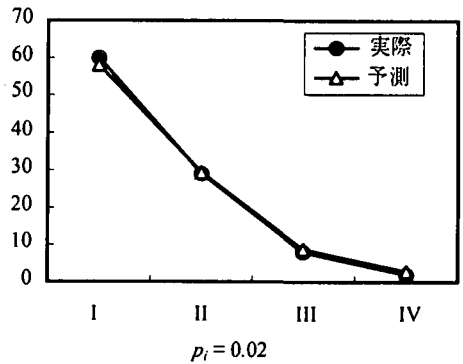


図-8 変状進行予測の計算結果

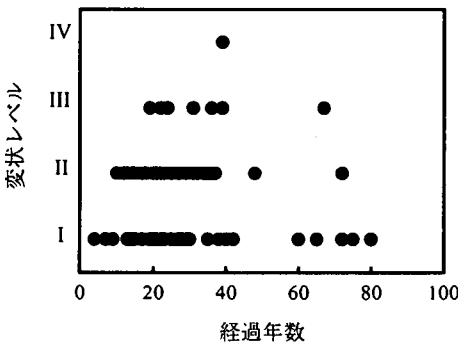


図-7 コンクリートの変状レベルの分布

至った施設はない。③計算ステップは1年とする。

また、本論文では、各変状レベル間の遷移確率は一定であるとした。これは、図-6で定義した変状レベルに基づいて定義した後述する変状レベルがほぼ時間的に等間隔となっていると判断したためであるが、今後変状に関するデータが蓄積されるにつれて、この仮定は見直す必要がある。このようにして作成した変状進行予測モデルでは、変状レベルIからIVに達するまでの遷移時間(時間ステップ数) T の平均値 $E(T)$ と分散 $Var(T)$ の値から、遷移確率行列 P を設定できる。 P が得られれば、計

算時間ステップ n における状態の確率ベクトル $p(n)$ は、初期状態確率ベクトル $p(0)$ に P を繰り返し乗じることにより $p(n) = p(0)P^n$ として得られることになる。

(3) 変状進行予測の試算結果

図-7は、ケーソン式岸壁のコンクリートに生じたひび割れ等の変状の実態調査結果を、経過年数ごとに整理したものである。このように、経過年数が長いほど変状レベルが高いとは言えず、構造・材料条件や環境条件などに大きく影響される。ここでは、これをばらつきと考慮して、平均的な変状レベルの進行を前述のモデルにて再現した。このようにして得られた結果を図-8に示す。実際の変状レベルの分布と予測結果を比較すると、きわめて良い一致をしている。この際の遷移確率は0.02である。この計算は、実態をできるだけ再現できるように試行錯誤的に遷移確率を変化させて得られたものである。経験的には、この遷移確率を与えることにより、平均的な性能の変状進行を予測できることになる。構造形式や環境条件ごとのより精緻な遷移確率の設定については、さらなる研究が必要であり、現在進めている。

図-9に、図-8から設定された遷移確率に基づいて得られるケーソン式護岸あるいは岸壁のコンクリートの劣

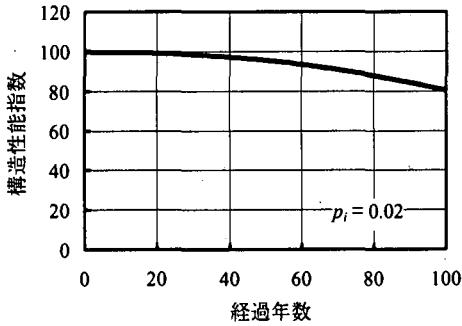


図-9 構造性能低下の予測結果

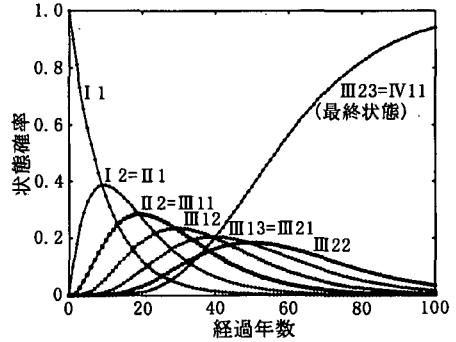


図-10 変状レベル確率ベクトルの経年変化

化に起因する変状に伴う構造性能低下の予測を示す。ここで、構造性能は耐荷力や変形性能を表しており、建設直後(設計時想定)を100として示している。供用限界性能や安全限界性能が設定できれば、施設の寿命が予測できることになる。仮に80の状態が供用限界であるとすれば、予測寿命は約100年となる。

一方、海岸保全施設の老朽化に関して、発生割合がもっとも多い洗掘を発端とする変状についての試算例を示す。このパターンでは、海底地盤に洗掘が発生し進展するプロセスを変状レベルI、根固工の沈下が発生し進展するプロセスを変状レベルIIとする。さらに、基礎工に損傷が発生し進展するプロセスから盛土材の吸出しが発生し空洞化が進展するプロセスを変状レベルIIIにあてはめ、基礎工の損傷をレベルIII1、吸出し空洞化をレベルIII2とする。

試算例として、レベルIはI1とI2の2段階、レベルIIはII1とII2の2段階、レベルIII1はIII11、III12とIII13の3段階、レベルIII2はIII21、III22とIII23の3段階であると仮定し、経過時間ごとにその変状レベル(状態)にある確率を図-10に示す。この場合の遷移確率は、コンクリート変状に関する計算と同様の手法で設定し、0.10となった。すなわち、前述の老朽度実態調査結果である経過年数40年程度で、吸出しの生じる変状レベル(レベルIII21)に存在する割合は20%程度であるという事実に合致することになる。今後同様に変状が進めば、変状レベルIII2の最終状態であるIII23(レベルIVの最初の状態IV11と等価)に達する確率は、時間経過とともに増加し、100年後には約0.95となることがわかる。

4. おわりに

老朽化により劣化や変状が生じた海岸保全施設の実態を調査した結果、構造形式ごとに様々な劣化や変状の発生が認められた。また、防災施設としての海岸保全施設の機能を低下させるような劣化や変状に至る前に、その兆候が施設外観に現れることがわかった。これらの劣化や変状を的確に捕捉できる点検マニュアルの策定が重要であるとともに、その進行を予測するモデルの構築が海岸保全施設の合理的なメンテナンスには重要である。

今回の検討結果から、マルコフ連鎖モデルに基づく変状予測進行モデルの適用性が確認できた。さらに、今後の点検データの蓄積と解析により、より実態に即した遷移確率を見出し、構造物の老朽化による劣化・変状の進行過程における維持補修の必要性の検討や各時点における構造物の破壊確率を算定することが可能となると考えている。

本研究を行うにあたり、老朽化実態調査の実施にご協力をいただいた関係者の方々に感謝申し上げます。

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, 52 p.
- 土木学会 (2000): 海岸施設設計便覧, pp. 515-537.
- 日本コンクリート工学協会 (2001): コンクリート構造物の診断のための非破壊試験方法研究委員会報告書, pp. 132-142.
- 横田 弘・小牟禮建一 (2002): 計画的な維持修繕によるライフサイクルコストの低減, 港湾, Vol. 79, No. 8, pp. 14-17.
- Yokota, H. and K. Komure (2003): Estimation of Structural Deterioration Process by Markov-Chain and Costs for Rehabilitation, 3rd Intl IABMAS Workshop, Lausanne, in printing.