

港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE

OF

THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No. 1131

June 2006

確率統計的手法による表法面コンクリート被覆構造物の
変状遷移評価システム構築

関 根 好 幸
横 田 弘
岩 波 光 保
加 藤 絵 万

独立行政法人 港湾空港技術研究所

Independent Administrative Institution,
Port and Airport Research Institute, Japan

目 次

要 旨	3
1. まえがき	4
2. 変状レベル評価に関する既往研究	5
2.1 マルコフ連鎖モデルを用いた変状評価手法	5
2.2 海岸保全施設の老朽化実態現地調査	5
2.3 構造物内部の空洞化に関する研究	5
2.4 洗掘や沈下による変状に関する研究	6
3. 海岸保全施設の変状レベル評価手法	6
3.1 変状レベル遷移モデルの設定	6
3.2 変状事象の評価指標	8
3.3 変状遷移の評価プロセス	10
4. マルコフ連鎖モデルの適用	10
4.1 変状遷移評価への適用性	10
4.2 マルコフ連鎖モデルの基本概念	10
5. 単純な状態遷移モデルでの検討	12
5.1 状態遷移モデルの仮定	12
5.2 遷移確率行列の設定	13
5.3 状態確率ベクトルでの評価	13
5.4 各変状レベル間での検討例	13
6. 変状事象に着目した状態遷移モデルでの検討	18
6.1 検討対象とする変状事象	18
6.2 状態遷移モデルの仮定	18
6.3 変状遷移評価システムの構築	18
7. 変状遷移評価システムによる検討例	21
7.1 構造モデルの設定	21
7.2 波浪条件の設定	21
7.3 空洞化の状態遷移の設定	23
7.4 波力による破壊確率の設定	24
7.5 変状遷移評価システムによる評価	29
7.6 考察	32
8. まとめ	32
9. あとがき	33
参考文献	33

Evaluation System on Time-Depending Change in Performance of Shore Protection Facility Based on Stochastic Method

Yoshiyuki SEKINE *
Hiroshi YOKOTA **
Mitsuyasu IWANAMI ***
Ema KATO ****

Synopsis

It is urgently required to establish performance verification methods for civil infrastructures as well as to rationally setup clear performance requirements. In particular, incorporating time-depending change in performance into the reliability-based design makes it possible to systematize performance verification methods of structure during the design lifetime.

In this study, change in the failure risk due to time-depending deformation was evaluated for a shore protection facility with concrete-covered slope in its front face. For this purpose, an analytical model was created to express the transition of deformation based on the stochastic approach by using the Markovian-chain model.

Through literature surveys, typical patterns of time-depending deformation of the facility during the lifetime were analyzed. Then, the following two patterns were focused as the most important and critical deformation: collapse of covering concrete due to wave forces and formation of a cave due to washing out of filling soils in consequence. The transition probability on formation of a cave was obtained by the cave growth rate. The failure probability on the collapse of concrete was evaluated by the first Gaussian approximation. Then these two probability models were incorporated in the Markovian-chain model. By the incorporation, we proposed the prediction method of the likelihood of the deformation of facility including the failure probability. The likelihood of the deformation was expressed by the probability vector of each state of deformation occurring in shore protection facilities. The applicability of the proposed system was confirmed by trial calculations.

Key Words : shore protection facility, deformation, Markovian-chain, life time risk

* Researcher of Structural Mechanics Division, Geotechnical and Structural Engineering Department
** Head of Structural Mechanics Division, Geotechnical and Structural Engineering Department
*** Senior Researcher of Geotechnical and Structural Engineering Department
**** Project Researcher of LCM Research Center for Coastal Infrastructures
3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan
Phon : +81-46-844-5059 e-mail : sekine-y83ab@pari.go.jp
Fax : +81-46-844-0255 URL: <http://www.pari.go.jp/bsh/jbn-kzo/kyodo/>

確率統計的手法による表法面コンクリート被覆構造物の 変状遷移評価システム構築

関根 好幸*
横田 弘**
岩波 光保***
加藤 絵万****

要 旨

社会基盤施設の整備において、要求性能の合理的かつ明確な設定および構造物の保有性能照査手法の確立が緊急に求められている。特に、供用中に進行する変状を信頼性設計に組み込むことによって、構造物のライフサイクルを考慮した性能照査技術の体系化が可能となる。本研究においては、表法面コンクリート被覆構造の海岸保全施設を対象として、マルコフ連鎖モデルを用いた確率統計的な解析手法に基づく変状遷移解析モデルを構築し、変状によるライフタイムリスクの経年変化を評価することを目的とする。

まず、海岸保全施設の変状に係わる既往の研究成果に基づき、表法面コンクリート被覆構造物に生じる変状事象を対象として、供用期間中に推移する変状レベルのモデルパターンを検討した。次に、このモデルパターン中、中詰土の吸出しによる空洞化の進展事象および波力による表法面被覆コンクリートの破壊発生事象に着目し、空洞化進展事象中の状態遷移確率を空洞化進展速度から設定し、波力による破壊発生確率を一次ガウス近似法で評価し、マルコフ連鎖モデルに組み込んだ。これにより得られた状態確率ベクトルで表される破壊確率を含む各状態確率により、構造物のライフタイムリスクの経年変化を評価した。確率統計的な手法による変状遷移評価システムの一例を提案し、試算によりその適用性が確認できた。

キーワード：海岸保全施設，変状，マルコフ連鎖，ライフタイムリスク

*構造強度研究室
**構造強度研究室 室長
***地盤・構造部 主任研究官
****LCM研究センター 特任研究官
〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 独立行政法人 港湾空港技術研究所
電話：046-844-5059 e-mail：sekine-y83ab@pari.go.jp
Fax：046-844-0255 URL：http://www.pari.go.jp/bsh/jbn-kzo/kyodo/

1. まえがき

近年、道路や鉄道をはじめとする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。海岸堤防や護岸など海岸保全施設においても昭和30年代の高潮・津波災害を契機として整備され、建設後40年以上経過したものが多く、老朽化による変状が顕著となった施設も散見される。このような変状が生じた施設に対しては、設計時に想定された高潮・津波に対して所要の防災機能を具備しているかどうかを確認し、具備していなければ、劣化や損傷といった変状への補修や補強による施設の維持工事や改良工事、あるいは更新など有効な対策を早急に施す必要がある。さらに近年では、防護水準の変化などにより高潮・津波の設計外力が見直されるケースがある。その場合には、その施設の安全性や防災機能を的確に照査しなければならない。また、ライフサイクルマネジメント(LCM)の観点からも、将来、さまざまな変状が発生する確率や破壊に至る確率(ライフタイムリスク)の的確な評価が求められる。すなわち、図-1.1に示すように、定期的な点検とそれに基づく的確な診断のもとに蓄積されたデータベースを用い、保有性能の現状評価および将来予測を行うことで、変状への対策法の種類や時期の提示を行い、ライフサイクルコスト(LCC)の削減および維持管理業務の合理化に寄与する。

本研究では、海岸保全施設の変状に係わる既往の研究成果および現地調査結果に基づき、表法面コンクリート

被覆構造物に生じる変状事象を対象として、設計供用期間中での変状レベルの遷移パターンを分類、モデル化する。また、マルコフ連鎖モデル(Markov Chain Model)を用いる手法により、確率統計的に変状レベルの遷移を表す。まず、変状レベル遷移を表す基本的なモデルでの試算によりライフタイムリスクの評価に対する有効性の確認を行う。さらに、遷移パターンモデル中のさまざまな変状事象から、実構造物において最も顕著にみられ、かつ防護機能が喪失する最大の原因となる中詰土の吸出しによる空洞化の進展現象と、空洞化進展中で起こりうる波力による表法面被覆コンクリートの破壊事象に着目し、作用外力、材料特性、地盤条件などの不確実性とばらつきを考慮し、検討対象構造モデルを設定して、試算による評価を行う。すなわち、後載の図-6.4にそのフローを示すように、(1)中詰土の吸出しにより構造物内部の空洞化が進展する事象については、空洞化の発生から構成材の破壊発生に至るまでの時間と状態を離散化し、各状態の時間ステップでの遷移確率を設定する。(2)波力による表法面被覆コンクリートの破壊事象については、確率変数を設定し破壊発生確率を一次ガウス近似法で評価する。(3)このように設定した各遷移確率と破壊発生確率をマルコフ連鎖モデルに組み込むことにより得られる状態確率ベクトルの経年変化を求める。(4)各状態確率ベクトルとして示される破壊確率も含めての各状態確率により、構造物の変状によるライフタイムリスクを評価する。

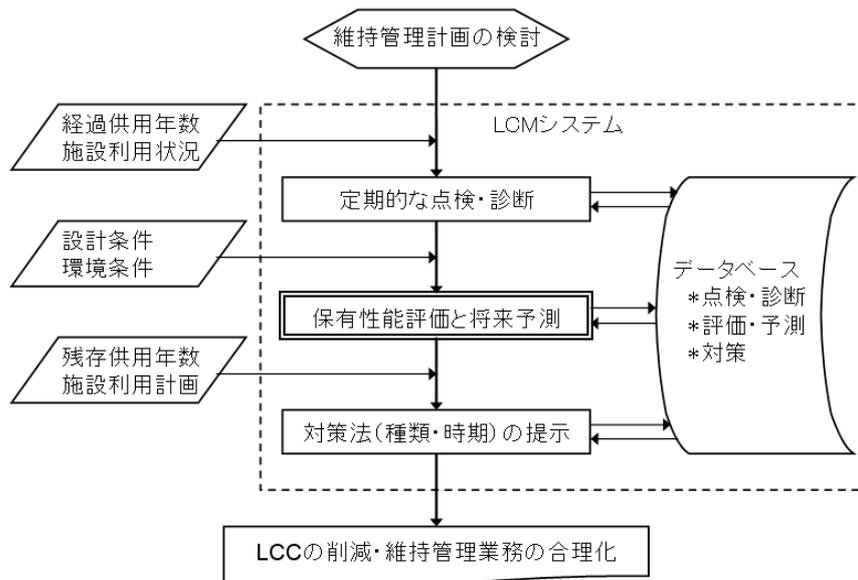


図-1.1 LCMにおけるライフタイムリスク評価の寄与

2. 変状レベル評価に関する既往研究

2.1 マルコフ連鎖モデルを用いた変状評価手法

本研究においては、Unit Step B-model のマルコフ連鎖モデルに基づく変状遷移評価システムを構築し、ケーススタディを行った。すなわち、ばらつきを考慮した構造物の寿命(平均遷移時間)から各変状レベル間での状態遷移確率を求め、遷移確率行列を決定し、得られた状態遷移確率ベクトルの経年変化により構造物のライフタイムリスクを評価した。この考え方は、Bogdanoffら¹⁾がマルコフ連鎖モデルを用いて疲労解析を行った手法に基づいており、海岸・海洋構造物の劣化評価に対しても藤本ら²⁾により適用が図られている。この手法は、時間に伴う変状の遷移を容易に表すことができる利点を持つが、各状態変化の寿命や進展速度を予め定式化しておく必要がある。

マルコフ連鎖モデルを用いた構造物の変状評価手法に関する研究は、近年になっても幾つか進められている。その中には、上記の手法とは異なる概念や解析手法に基づく研究も見られる。特に道路・交通工学の分野では、蓄積されたデータを基に劣化評価に関する研究が進められ、マルコフ連鎖モデルに基づく解析手法も構築されている。武山ら³⁾は、マルコフ連鎖モデルを用いてアスファルト舗装の状態推移を評価し、補修計画のシステム化を図っている。この研究では、舗装の状態をランク分けし、蓄積された実際の舗装路面性状調査データを基にして、状態ランクが推移する確率を求めている。さらに、補修の影響評価を取り込み、補修効果の分析に適用している。また、建築構造物の確率論的損傷予測モデルに適用した研究が行われ、その手法を地震時の安定性評価に適用した例も見られる。高橋ら⁴⁾は、構造物の状態予測に確率過程モデルを導入し、マルコフ連鎖モデルによる信頼性予測モデルを構築している。構造物の状態は無損傷、損傷、破壊の3段階に分類され、状態が推移する確率を信頼性評価手法に基づいて表し、システムの安全性評価に適用を図っている。さらに、鈴木ら⁵⁾は上記の手法を地震作用時の橋梁システムの安定性評価に適用し、構造部材の破壊確率と損傷確率を算定する手法を提案している。そして、支承、橋脚、杭基礎の破壊・損傷がシステムの安全性に及ぼす影響について検討している。

マルコフ連鎖モデルに基づく港湾施設のコンクリート構造物の劣化進行評価例としては、小牟禮ら^{6,7)}がRC栈橋上部工の塩害による劣化進行モデルの開発を図っている。

全国から抽出した港湾の栈橋について劣化実態調査を行い、得られた結果から劣化度分布の比較検討を行っている。そして、マルコフ連鎖モデルを用いることにより、劣化度のばらつきを考慮した劣化進展評価が可能であることを示し、上部工の設置位置や気温などの対象部材に対する諸条件から、劣化進行を予測する評価モデルの構築を図っている。さらに、維持管理計画への劣化進行モデルの適用を図り、ライフサイクルコストの算定を図った結果を示している。

2.2 海岸保全施設の老朽化実態現地調査

横田ら⁸⁾は、海岸保全施設の老朽化に伴う安全性低下モデルを構築することを目標に、代表的な海岸保全施設である三面張り式防潮堤(図-3.1(a)コンクリート被覆式表法被覆工の例に示す標準断面図と同様の構造)および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ている。建設後約40年を経過した三面張り式防潮堤の調査結果では、開きやずれが顕著な目地が全目地箇所の10~20%で見られ、その箇所において中詰土の吸出しによる局所的な空洞化の発生を確認している。また、水叩きコンクリートに法線方向の長いひび割れが見られる箇所があり、その箇所において地盤沈下に起因すると推測される広範囲にわたる空洞化も生じていることを確認している。一方、パラペットを含む表法面および裏法面には、コンクリートの乾燥収縮によるひび割れが若干発生しているものの、顕著な変状は見られないとしている。

この調査結果からも、表法面コンクリート被覆構造物の変状遷移評価システムの構築を図る上で、中詰土の吸出しによる空洞化の進展を考慮した評価手法の開発が重要であることが示唆される。

2.3 構造物内部の空洞化に関する研究

海岸保全施設の被災原因として、中詰め材料の吸出しにより構造物内部に空洞が生じ、耐波性能が低下した結果、破壊に至る事例が多いことは以前から良く知られている。そして、中詰め材料の吸出しによる空洞化の要因については、幾つかの検討が進められ、目地の老朽化や施工不良、さらには根固め工の破損による洗掘などがその発生要因として明らかにされてきた。岩崎ら⁹⁾は、空洞化の発生要因として、波浪による海底地盤の液状化に注目し、実験的な検討により空洞化発生機構の考察を行っている。その結果、目地や接合部の隙間からの吸出し以外にも、地盤の支持力低下により中詰め材料が構造物の下端部から前面に流動し、空洞化が発生することがあ

ることを明らかにしている。また、護岸背後の砂地盤内に空洞化が発生する事象については、多くの研究が進められている。例えば、原田ら¹⁰⁾は、砂粒子間の相互作用力を表すことができる手法として、三次元個別要素法を適用し、砂の吸出しによる砂層内の空洞形成過程の数値シミュレーションを行っている。

このような研究成果によって、吸出しによる空洞化の発生メカニズムは明らかにされてきている。しかし、空洞化進展の状況や速度の定量的な評価については、十分には明らかにされていない。また、空洞化の進展が評価対象構造物の健全性に与える影響や将来の進展状況の予測などは、今後の課題であると考えられる。

2.4 洗掘や沈下による変状に関する研究

海岸構造物に生じる前面海底の洗掘や基礎地盤の圧密沈下、また被覆材などの安定性や損傷に関しては、これまでに多くの研究が進められ、成果が得られている。しかし、本研究で対象とする表水面コンクリート被覆構造物に関しては、防波堤周辺の洗掘や沈下に関する研究事例は多く見られるが、長期的な進展速度や寿命に関してまとめられたものは少ない。ここでは、近年の研究事例の中で、変状評価に直接適用を図ることは難しいが、参考となる研究例を示す。

山田ら¹¹⁾は、実務に適用できる洗掘量予測手法の確立のため、過去の論文や被災調査結果を基に洗掘量に係るデータを抽出し、洗掘に影響するパラメータを分析している。また、Boussinesq モデルと k-eモデルに基づく洗掘量の数値予測モデルを提案し、水理模型実験による海浜の侵食・堆積、構造物周りの洗掘傾向を良好に再現

できることを示している。その手法は、今後実海域の計測データとのキャリブレーションを進めることにより、実構造物への適用可能性を有すると考えられる。

小田ら¹²⁾は、消波ブロック防波堤を対象に、洗掘発生限界や洗掘深さの時間的発達に関して実験的に検討している。特に、洗掘深さの時間的発達について検討を行い、洗掘深さの時間変化の予測式を提案し、二次元水槽実験との比較により予測式の有効性を示している。

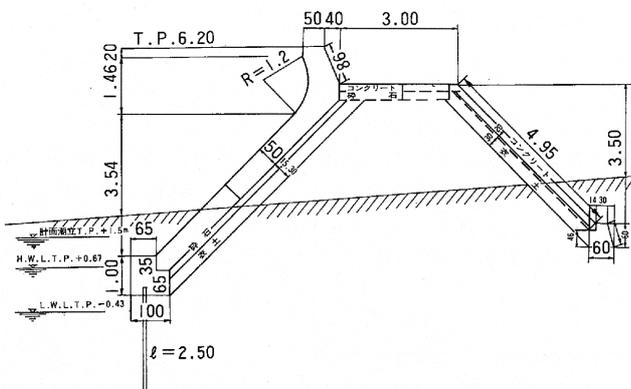
荒木ら¹³⁾は、信頼性評価に基づく捨石構造物の安定性の検討として、人口リーフ被覆石の移動確率を算定している。移動確率の算定にはモンテカルロ法を用い、二次元水槽を用いた実験結果と比較している。また捨石の移動を精度良く評価する手法として三球体モデルを用いた検討を行っている。

上記の研究はいずれも、表水面コンクリート被覆構造物の破壊要因の一つである構造物前面の海底洗掘の評価手法構築に有効な成果と考えられる。ただし、多くは水槽実験での比較検討および考察であり、実構造物への適用には、いまだ課題も見られる。実海域での洗掘量の時間変化の予測を可能とするためには、さらにデータの収集整理や評価手法の検討が必要と考えられる。

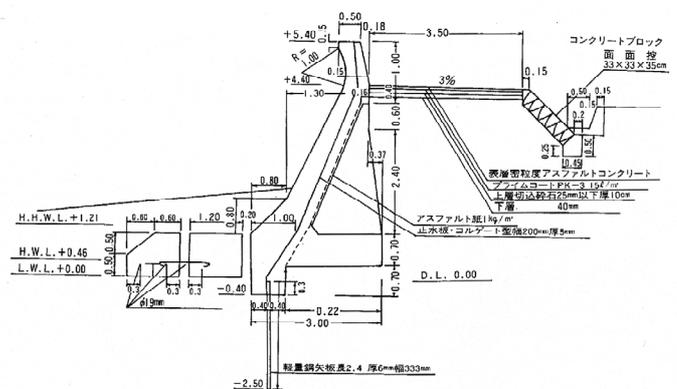
3. 海岸保全施設の変状レベル評価手法

3.1 変状レベル遷移モデルの設定

表水面コンクリート被覆構造物に生じる変状事象を対象として、設計供用期間中での変状レベルの遷移パターンを分類、モデル化した。表水面コンクリート被覆構造物の海岸保全施設の標準断面図の例¹⁴⁾を図-3.1に示す。



(a) コンクリート被覆式表法被覆工の例 (単位:m)



(b) 扶壁式表法被覆工の例 (単位:m)

図-3.1 表水面コンクリート被覆構造の海岸保全施設の断面形状の例

表-3.1 ケーソン式防波堤の変状度合いの評価区分の一例

評価区分	変状の範囲	変状の程度，進行速度	対応方針	
A	AA	施設の主要部を含め，大部分の部位に大きな変状が発生．	構造物の大部分が破壊，安定性欠如．施設の機能も著しく低下．	直ちに全面復旧．
	A ₁	施設の主要部等に広範囲の変状が発生．	堤体の安全性が非常に低下．変状が急激に進行し，破壊につながる恐れあり．	早急に変状進行防止処置を施し，変状区間を補修する．
	A ₂	施設の主要部等に部分的な変状が発生．	堤体の安全性の低下．変状の進行により，変状規模が拡大する恐がある．そのまま放置すれば大きな破壊につながる．	変状進行防止処置のみ施しておく，適当な時期に完全補修する．
	A ₃	施設の主要部やその他の部位に軽い変状が発生．	現状では堤本体の安定に対し問題はないが，変状が進行する恐がある．	変状進行防止処置のみ施しておく，その後経過を監視する．
B	B ₁	施設の主要部に微少な変状あるいは主要部以外の箇所や附帯施設に中～小規模の変状が発生．	堤体の安定性では問題ないが，施設の機能に支障が生ずる．これ以上の変状進行の恐れは少ない．	機能上の変状が生じないように処置し，以降の監視を強化する．
	B ₂		堤体の安定面および施設の機能上もあまり問題なし．これ以上の変状進行の恐れは少ない．	変状はそのままとし，以降の監視を強化する．なお，場合により外観の補修を行う．
C	C ₁	施設の主要部以外で，軽微な変状が発生．	変状は軽微で，変状進行の恐れはないが，外観上やや変状が目立つ．	外観の補修のみを行い，以降，重点的に点検を行う．
	C ₂		変状は軽微で，変状進行の恐れはない．また，外観上も特に問題はない．	以降，重点的に点検を行う．
S	変状なし．	変状なし．	現状のまま．	

(1) 変状度合いの評価区分

安間ら¹⁵⁾は，代表的な海岸保全施設である護岸，堤防および離岸堤を対象として，各構造物の変状現象の特性を把握し，変状現象の点検方法，評価方法ならびに対策の基本的な考え方について検討を行っている．

また，「港湾構造物の維持・補修マニュアル」¹⁶⁾には，さまざまな港湾構造物の変状度合いの評価区分が示されている．一例として，ケーソン式防波堤の変状度合いの評価区分を表-3.1に示す．ここでは，大きな変状をA，中小規模の変状をB，軽微な変状をC，変状なしをSとしている．また，それぞれ変状の程度，進展速度の差異により，AA，A₁，A₂，A₃，B₁，B₂，C₁，C₂と細分されている．

(2) 変状レベルの分類

構造物の変状は，時間の経過に伴い遷移する．また，一つの構造物においても，変状が発生する部位とその進行のプロセス，さらにはそれらの組み合わせパターンが多数存在する．例えば，安間ら¹⁵⁾は，構造物の健全な状態から破壊に至るまでを5段階に分類し，一般的な変状レベルとして表-3.2のように示している．

表-3.2 変状レベルの分類例

変状レベル	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変状であって，まったく対策の必要がない段階
II	多少の劣化や軽度の損傷などの変状がみられるが，施設の安全性の低下は少なく，機能の低下はない段階
III	変状が拡大進行し，施設の安全性低下，多少の機能低下が認められる段階
IV	変状が大きく，施設の安全性および機能がか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

(3) 変状レベル遷移パターンのモデル化

堤防や護岸などの海岸保全施設で，図-3.1に示したような表法面がコンクリートで被覆された構造物を例に，変状の発生から拡大，安全性および機能の低下，破壊され機能停止へと進行する変状連鎖を，変状の発生部位やその進行に影響する因子により，次の5種類に遷移パターンを大別した．

- ・コンクリート劣化パターン
 - 温度変化や乾燥収縮，化学作用などによる劣化
- ・洗掘パターン
 - 繰り返し作用する波力や潮流による劣化
- ・圧密パターン
 - 基礎地盤の圧密沈下による劣化
- ・波力パターン
 - 台風などの異常時波浪による波力で生じる損傷
- ・越波パターン
 - 台風などの異常時波浪による越波で生じる損傷

これらの遷移パターンを表-3.2の各変状レベルに対応させ、安間ら¹⁵⁾によるコンクリート被覆式傾斜護岸・堤防の変状連鎖の提案に、横田ら⁸⁾の現地調査結果などをふまえて、モデル化した結果を表-3.3に示す。

もちろん各パターン単独での変状発生や進行のみならず、各パターン間あるいは変状事象間での複雑な相互作用も考えられる。さらに、それぞれの変状事象の発生状況や進行速度も異なり、場合によっては、より先の変状レベルへ一気に移動する場合も考えられる。また、表-3.3に示した遷移パターンのほかにも、地震や漂流物

の衝突など、損傷あるいは破壊の発生原因が考えられる。

ここで、表-3.3に示した遷移パターンのいずれにおいても、変状レベルⅢで中詰土の吸出しによる空洞化の事象が見られるため、その発生原因となるそのほかの事象を変状レベルⅢ1，空洞化の事象を変状レベルⅢ2として区別した。また、変状レベルⅣ以降は、いずれの遷移パターンにおいても、ほぼ同様の変状事象となる。ここで、変状レベルⅣは、施設としての安全性および機能の大幅な低下が生じる段階で、構成材の破壊や陥没による段階を変状レベルⅣ1，構造物全体での破壊や陥没による段階を変状レベルⅣ2として区別した。

3.2 変状事象の評価指標

表法面コンクリート被覆構造物を検討対象とした表-3.3の変状レベル遷移パターンモデルにおいて、変状レベルⅣ，Ⅴで見られる変状事象はいずれのパターンにおいてもおおむね共通である。また、維持管理の観点では、変状レベルⅢ2での空洞化事象が進行し、施設としての安全性および機能はかなり低下した段階(変状レベルⅣ1)に達する状態が管理限界、すなわち、維持管理の最終段階と考えられる。よってここでは、変状レベルⅠからⅢ2までの変状連鎖の関連状況を考慮し、次

表-3.3 表法面コンクリート被覆構造物の変状レベル遷移パターンモデル

パターン	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ1	Ⅲ2	Ⅳ1	Ⅳ2	Ⅴ
コンクリート劣化	コンクリート劣化 ひび割れ・剥離	構成材耐力低下	構成材(一部)損傷				
洗掘	前面海底洗掘	根固工沈下 構造物下部洗掘	基礎工沈下・損傷 構造物移動・沈下 目地開き・ずれ				
圧密	基礎地盤沈下	構造物沈下(微小)	構造物沈下 目地開き・ずれ	中詰土吸出し・空洞化	構成材破壊・陥没	構造物破壊・陥没	施設破壊
波力			構成材(表法面)損傷				
越波			構成材(天端・裏法)損傷				

の(a), (b), (c)の3つの場合を例として、各変状事象の発生や進行にかかわる影響因子と、変状遷移を総合的に評価するための評価指標の一例をとりまとめ、表-3.4に示す。

- (a) コンクリートの劣化に、波力による損傷が影響する場合。
- (b) 洗掘による場合。
- (c) 圧密沈下の進行に伴う越波量の増加が、変状に影響する場合。

例えば、上記(a)の場合では、主要材料であるコンクリートが劣化し、構成材としての耐力が低下し、損傷を生じ、中詰土の吸出しによる空洞化が生じる。この

間の各変状レベルに対して設定した影響因子と評価指標の一例を表-3.4(a)に示した。すなわち、コンクリートは、波浪などの繰り返し作用する外力、温度変化や乾燥収縮などの物理的な作用や、アルカリ骨材反応などの化学的な作用により劣化が進行する。劣化の進行度合いは、構造物から採取したコア供試体に対する試験や、反発度法などで測定された圧縮強度により評価する。さらに劣化が進行し、ひび割れや剥離を生じた箇所は、その幅や長さにより評価する。また、波浪など直接外力による構成材としての損傷の度合いは、その構造部材としての安全率などにより評価する。構造物全体としての安定性、作用外力に対する抵抗性の低下は、中詰土の吸出しによる空洞化の割合により評価する。

表-3.4 変状レベルに対する影響因子と評価指標の例

(a) コンクリートの劣化に波力による損傷が影響する場合

変状レベル	変状の状態	影響因子	評価指標
I	コンクリートの劣化, ひび割れ・剥離	温度変化や乾燥収縮, 化学作用, 波浪	コア試験値, ひび割れ・剥離の幅・長さ
II	構成材としての耐力低下	温度変化や乾燥収縮, 化学作用	コア試験値
III1	構成材(表法・その他)の損傷	波浪	損傷度
III2	中詰土の吸出しによる空洞化	波浪, 潮流, 中詰土の種類・性質	空洞化率

(b) 洗掘による場合

変状レベル	変状の状態	影響因子	評価指標
I	前面海底の洗掘	波浪, 潮流, 水深, 海底土質	洗掘量(深さ・広さ)
II	根固工の沈下	根固工自重	沈下量(深さ・範囲)
	構造物下部の洗掘	波浪, 潮流, 水深, 基礎地盤土質	洗掘量(深さ・広さ)
III1	基礎工の沈下	基礎工自重	沈下量(深さ・範囲)
	基礎工の損傷	基礎工(構造物全体)自重	損傷度
	構造物の移動・沈下	構造物自重	移動・沈下量(距離・深さ・範囲)
	目地の開き・ずれ	(上記の変状状態)	目地隙間率(開き・ずれの幅・長さ)
III2	中詰土の吸出しによる空洞化	波浪, 潮流, 中詰土の種類・性質	空洞化率

(c) 圧密沈下の進行に伴う越波量の増加が変状に影響する場合

変状レベル	変状の状態	影響因子	評価指標
I	基礎地盤の沈下	基礎地盤土質	沈下量(深さ・広さ)
II	構造物の微小沈下	構造物自重	沈下量(深さ・範囲)
III1	構造物の沈下	構造物自重	沈下量(深さ・範囲)
	目地の開き・ずれ	(上記の変状状態)	目地隙間率(開き・ずれの幅・長さ)
	構成材(天端・裏法)の損傷	波浪	損傷度
III2	中詰土の吸出しによる空洞化	波浪, 潮流, 中詰土の種類・性質	空洞化率

ラムを構成しやすく、また行列表示を用いるため計算プロセスが簡単である。

3.3 変状遷移の評価プロセス

変状レベル遷移の評価は、3.2で示した変状事象の評価指標に対して、確率統計的手法として4.1に示すマルコフ連鎖モデルを適用することにより、次のようなプロセスで行えると考えた。

- (1) 各変状事象の評価指標を決定。
- (2) 各変状事象の遷移時間(進行速度)を推定。
- (3) 各変状事象間での遷移確率を算定(推定)。
- (4) 得られた各変状事象間での遷移確率からマルコフ連鎖モデルにおける遷移確率行列を決定。
- (5) 決定した遷移確率行列により変状レベル遷移を総合的に評価。

4. マルコフ連鎖モデルの適用

4.1 変状遷移評価への適用性

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。マルコフ連鎖の基礎は、この過程がまさに今あるところの状態(現在の状態)から、次の時間ステップでは、現在の状態に留まる場合も含め、いずれかの状態へ遷移する確率を求めることにある。

マルコフ連鎖モデルが、変状遷移評価に適している理由として、次のことが挙げられる。

- (1) 複数の現象を一つの遷移確率行列に組み込むことができ、それらの分布特性が表現できる。
- (2) 初期状態において、変状のいずれの段階にあるかの確率を初期状態ベクトルで自在に変更できる。
- (3) 変状過程の途中から破壊が生じるというような別の事象への遷移を考慮できる。
- (4) 繰返し点検や定期および不定期に補修を行った場合の信頼性変化を考慮できる。
- (5) 供用期間中になんらかの理由で境界条件が変化するような場合にも適用可能である。
- (6) 単一の遷移確率行列で表現できない複雑な状態遷移も、多数の遷移確率行列を準備して周辺分布を適用すればよく、その計算も簡単である。
- (7) 累積破壊確率の評価だけでなく、発見される損傷や残留損傷に対する情報も状態確率ベクトルから得ることができる。
- (8) 変状の段階と供用時間の両方が離散的でプログ

以上のような適用性をふまえて、2.1にその例を挙げたように、各方面においてもマルコフ連鎖モデルを用いた構造物の変状評価手法に関する研究が行われている。

4.2 マルコフ連鎖モデルの基本概念

(1) 確率過程

確率論および統計学において確率過程は、ある一つのプロセスによっても生じる不規則現象(海岸保全施設の場合、例えば通常の波浪や潮流、台風や津波、高潮のような自然現象など)であり、時間領域における変動が確率論の法則によって記述できるとき、その現象は確率過程あるいは不規則過程と呼ばれる。確率論の観点からは、確率過程 $P(t)$ は確率変数の集合として定義される。この変数が離散的であれば、それを離散的パラメータ過程という。例えば、二項過程、ポアソン過程などはこれにあたる。一方、変数が連続型ならば、その過程は連続的パラメータ過程という。ガウス過程はその一例である。

離散的パラメータ過程は一般に、 n 個の確率変数 $X(t_1), X(t_2), \dots, X(t_n)$ の多次元確率分布法則を作ることによって定義される。多次元確率分布関数は、任意の状態空間での状態 x_1, x_2, \dots, x_b に対して次のようになる。

$$F_{X(t_1), X(t_2), \dots, X(t_n)}(x_1, x_2, \dots, x_b) \\ = P(X(t_1) \leq x_{t_1}, X(t_2) \leq x_{t_2}, \\ \dots, X(t_n) \leq x_{t_n}) \quad (4.1)$$

上式を実用的な形式にするため、ある程度まで単純化する必要がある。一般に確率過程が「互いに独立な区間」と仮定できれば、 n 個の確率変数 $X(t_1), X(t_2), \dots, X(t_n)$ の多次元分布が、1 個の確率変数 $X(t)$ の確率分布関数を知るだけで決定できることになる。

確率過程論は通常、定常過程および非定常過程の二つに分けて議論されるが、ここでは定常過程についてのみ取り扱うこととした。

(2) マルコフ連鎖モデル

一つの確率過程における状態は、ある種の変数(例えば、時間や空間)に従って変化する。その変数の関数の形で、ある状態から他の状態に遷移すること、あるいは

は遷移する確率は、その状態以前の過程におけるすべての状態に依存するのが一般的である。しかし、マルコフ的である(マルコフ性をもつ)確率過程は、マルコフ過程と呼ばれ、ある状態から他の状態に遷移する確率が、ある状態(現在の状態)によってのみ決まる確率過程である。マルコフ過程は、状態空間が加算空間の場合、あるいは有限な集合からなる場合に、一般的にマルコフ連鎖と呼ばれる。さらに、状態の変化が、変数の離散的な点(例えば、時間軸上の離散的な時刻としての時点)でのみ起こりうる時、離散パラメータのマルコフ連鎖と呼ばれる。すなわち、確率過程 $P(t)$ が、離散パラメータのマルコフ連鎖では、状態空間 S の任意の状態 x_1, x_2, \dots, x_b 間での状態遷移が、変数 t の任意の離散的な値 $t_1 < t_2 < \dots < t_n$ においてのみ起こりうる。

確率変数 $X(t)$ の値は、変数 t におけるこの過程の状態を表す。ここでの状態とは、事象がまったく発生しない状態、1回だけ、2回だけ、あるいは何回も発生するという状態を指す。

一般的な確率過程の場合、その条件付確率は、 t_n での状態以前の過程におけるすべての状態 $X(t_1), X(t_2), \dots, X(t_{n-1})$ に依存して、式(4.2)の左辺で表される。しかし、マルコフ連鎖の場合、その条件付確率は、その直前の状態 $X(t_{n-1})$ のみによって、式(4.2)の右辺で表される。

$$P(X(t) = x_t | X(t_1) = x_{t_1}, X(t_2) = x_{t_2}, \dots, X(t_{n-1}) = x_{t_{n-1}}) = P(X(t) = x_t | X(t_{n-1}) = x_{t_{n-1}}) \quad (4.2)$$

例えば、変数 t を時間軸上の離散的な時刻としての時点とすると、 $0 \leq t_n \leq t_n$ のとき、先行する時点 $t_n = m$ において状態 $x_m = i$ にあったこの過程が、時点 $t_n = n$ において状態 $x_n = j$ へ遷移する確率、すなわち遷移確率は、確率変数 $X(t)$ の確率関数

$$p_i(n) = P(X_n = i) \quad (4.3)$$

および条件付き確率関数

$$p_{i,j}(m,n) = P(X_n = j | X_m = i) \quad (4.4)$$

によって決定される。式(4.4)は、遷移確率関数とも呼ばれる。もしこの過程が定常、すなわち、時間的に一

様な遷移確率をもつマルコフ過程であれば、 $p_{i,j}(m,n)$ は、時間差 $n-m=s$ のみに依存し、

$$p_{i,j}(s) = P(X_{m+s} = j | X_m = i) \quad (4.5)$$

ただし、 $m \geq 0$

となる。式(4.5)は、 s ステップ遷移確率関数を表している。すなわち $p_{i,j}(s)$ は、ちょうどいま i という状態にある定常過程が、 s ステップ後に j という状態になる確率を与える。1ステップ遷移確率 $p_{i,j}(1)$ は通常 $p_{i,j}$ と書かれ、次のようになる。

$$p_{i,j} = P(X_{n+1} = j | X_n = i) \quad (4.6)$$

ただし、 $m \geq 0$

状態空間

$$S = \{0, 1, 2, \dots, n\} \quad (4.7)$$

を有する定常マルコフ連鎖 X_n は、 n 個の状態について1ステップ遷移確率 $p_{i,j}$ を第 i 行第 j 列の各要素として、次のような n 行 n 列の正方行列 P の形で表示することができる。

$$P = \begin{pmatrix} p_{1,1} & p_{1,2} & p_{1,3} & \dots & p_{1,n} \\ p_{2,1} & p_{2,2} & p_{2,3} & \dots & p_{2,n} \\ p_{3,1} & p_{3,2} & p_{3,3} & \dots & p_{3,n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{n,1} & p_{n,2} & p_{n,3} & \dots & p_{n,n} \end{pmatrix} \quad (4.8)$$

これを遷移確率行列と呼ぶ。

ここで $p_{i,j}$ は、任意の i, j に対して、次のような確率の性質をもつ。

$$p_{i,j} \geq 0 \quad \text{for all } i, j$$

$$\sum_{j \in S} p_{i,j} = 1 \quad \text{for all } i \quad (4.9)$$

すなわち $p_{i,j}$ は、互いに排反で、かつすべての場合をつくしており、各行の確率の和は1となる。

一様なマルコフ連鎖では、将来の任意の時点における状態を決定する外的条件は、今あるところの状態(初期状態)に関する確率のみを与えればよい。

初期($t=0$)状態の確率、および将来の任意の時点 t

における状態の確率は、それぞれ式(4.10)、および式(4.11)のような行ベクトルで表現できる。

$$\mathbf{p}(0) = \{ a_1(0), a_2(0), \dots, a_n(0) \} \quad (4.10)$$

$$\mathbf{p}(t) = \{ a_1(t), a_2(t), \dots, a_n(t) \} \quad (4.11)$$

各要素 $a_i(0)$ および $a_i(t)$ は、それぞれ初期状態および時点 t において、各状態 i にある確率である。初期状態が既知である場合、例えば、状態 i にある場合には、 $a_i(0) = 1$ であり、他のすべての要素の値は 0 となる。

1 ステップのちに状態 j にある確率は、全確率の定理¹⁷⁾から式(4.12)のように得られる。

$$\begin{aligned} a_j(1) &= P(X_1 = j) \\ &= \sum_{i \in S} P(X_0 = i)P(X_1 = j | X_0 = i) \\ &= \sum_{i \in S} a_i(0)p_{i,j} \end{aligned} \quad (4.12)$$

同様に、2 ステップのちに状態 j にある確率は、式(4.13)のように得られる。

$$\begin{aligned} a_j(2) &= P(X_2 = j) \\ &= \sum_{k \in S} P(X_1 = k)P(X_2 = j | X_1 = k) \\ &= \sum_{k \in S} a_k(1)p_{k,j} \end{aligned} \quad (4.13)$$

式(4.12)および式(4.13)を状態確率ベクトル $\mathbf{p}(t)$ と遷移確率行列 \mathbf{P} とにより行列表示すると、それぞれ式(4.14)および式(4.15)のようになる。

$$\mathbf{p}(1) = \mathbf{p}(0)\mathbf{P} \quad (4.14)$$

$$\mathbf{p}(2) = \mathbf{p}(1)\mathbf{P} = \mathbf{p}(0)\mathbf{P}^2 \quad (4.15)$$

したがって、帰納法的に s ステップのちの状態確率ベク

トル $\mathbf{p}(s)$ は、初期状態ベクトル $\mathbf{p}(0)$ に遷移確率行列 \mathbf{P} を s 回繰り返して乗じることにより、式(4.16)のようになる。

$$\mathbf{p}(s) = \mathbf{p}(0)\mathbf{P}^s \quad (4.16)$$

よって、マルコフ連鎖 X_n の確率分布は、遷移確率行列 \mathbf{P} ならびに出発状態の確率ベクトル(初期状態ベクトル) $\mathbf{p}(0)$ によって定められる。

5. 単純な状態遷移モデルでの検討

5.1 状態遷移モデルの仮定

ここでは、以下のような仮定を行った。

- Unit Step B Model に従う。
- 一様マルコフ連鎖モデルとする。

まず、マルコフ連鎖モデルのうち Unit Step B Model と呼ばれるモデルを採用した。このモデルでは図-5.1に示すように、時点(時間ステップ、例えば年数) t には、ある段階の状態 i であり、単位時間(単位時間ステップ、例えば1年)経過後の $t+1$ には、確率 q_i で次の段階の状態 $i+1$ へのみ遷移する。

すなわち、遷移確率行列 \mathbf{P} は、次のように表される。

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} p_1 & q_1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & p_2 & q_2 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & p_3 & q_3 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p_4 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & p_{b-1} & q_{b-1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (5.1)$$

ここで p_i は、時点 t に状態 i であり、単位時間経過後の $t+1$ にも状態 i に留まる確率である。

さらに、状態遷移確率割合 q_i が一定値の一様マルコフ連鎖モデルとする。すなわち、

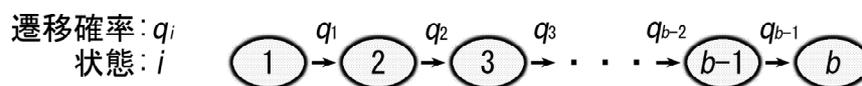


図-5.1 Unit Step B Model での状態遷移

$$\gamma_i = p_i / q_i = \gamma : \text{const.} \quad (5.2)$$

$$p_i + q_i = 1 \quad (5.3)$$

であるから、

$$p_i = p : \text{const.} \quad (5.4)$$

$$q_i = q : \text{const.} \quad (5.5)$$

$$\gamma = p / q : \text{const.} \quad (5.6)$$

$$p + q = 1 \quad (5.7)$$

となる。

5.2 遷移確率行列の設定

最初の状態 1 から最終の状態 b に達するまでの時間 (時間ステップ数, 例えば経過年数) T の平均 $E(T)$ と分散 $Var(T)$ は, 一般的に次の式で与えられる。

$$E(T) = \sum_{i=1}^{b-1} (1 + \gamma_i) \quad (5.8)$$

$$Var(T) = \sum_{i=1}^{b-1} \gamma_i (1 + \gamma_i) \quad (5.9)$$

ここで, Unit Step B Model に従う一様マルコフ連鎖モデルの場合, 式(5.6)より状態 $i=1$ から $b-1$ のすべての $\gamma_i = \gamma$ は一定値であり,

$$E(T) = (b-1)(1 + \gamma) \quad (5.10)$$

$$Var(T) = (b-1)\gamma(1 + \gamma) \quad (5.11)$$

となる。よって, $E(T)$ と $Var(T)$ の値があれば, 式(5.1)で表される遷移確率行列 P は, 推定が可能となる。以上のプロセスをまとめると以下のとおりとなる。

- (1) 状態遷移速度が一定である評価指標を仮定する。
- (2) 状態 1 から状態 b への遷移時間 T の平均 $E(T)$ と分散 $Var(T)$ の値を既存のデータなどから推定する。
- (3) それぞれの値を式(5.10)と式(5.11)に代入し, 状態の分割数 b , すなわち式(5.1)の遷移確率行列 P のサイズと式(5.6)の状態遷移確率割合 $\gamma (= p/q)$ とを求める。
- (4) 以上の結果を基に, 式(5.7)の条件から状態遷移確率 p と q を決定し, 式(5.1)から Unit Step

B Model に従う一様マルコフ連鎖モデルにおける遷移確率行列 P を表す。

5.3 状態確率ベクトルでの評価

遷移確率行列 P が得られれば, 各時点 t における状態確率ベクトル $p(t)$ は, 式(4.16)で初期状態ベクトル $p(0)$ に遷移確率行列 P を t 回繰り返し乗じることにより得られ, 各時点 t に状態 i にある確率 $a_i(t)$ は,

$$p(t) = \{ a_1(t), a_2(t), \dots, a_b(t) \} \quad (5.12)$$

のように状態確率ベクトル $p(t)$ の各要素として得られる。これらの状態確率 $a_i(t)$ により, 将来, 構造物にさまざまな変状が発生する確率や破壊に至る確率として, ライフタイムリスクを評価する。

5.4 各変状レベル間での検討例

(1) 遷移確率行列の決定

マルコフ連鎖モデルを用いて, 海岸保全施設の変状レベル自体を評価指標とした遷移モデルを検討した。

ここでは, 単純な状態遷移モデルとして, Unit Step B Model に従う一様マルコフ連鎖モデルで, 状態 1 から状態 b までの各状態遷移と遷移時間との離散状態を単純化して仮定し, 遷移確率行列 P を決定した。すなわち, 5.2 中のプロセス(2)と(3)を単純化し, 表-3.3に示した構造物の7段階の変状レベルを状態の分割数 $b=7$ とし, 時間ステップを1年として, 海岸保全施設の現地実態調査を実施した際の状況⁹⁾などから最初の段階から最終の段階までの遷移時間 $T=60$ 年を仮定した。 $b=7$ と $E(T) = 60$ とを式(5.10)に代入し, 状態遷移確率割合 $\gamma = 9$ を求め, 式(5.6), (5.7)から $p=0.9$ と $q=0.1$ とを決定し, 式(5.1)にあてはめ遷移確率行列 P を次のように決定した。

		遷移先の変状レベル							
		I	II	III1	III2	IV1	IV2	V	
遷移元の変状レベル	I	$P =$	0.9	0.1	0	0	0	0	0
	II		0	0.9	0.1	0	0	0	0
	III1		0	0	0.9	0.1	0	0	0
	III2		0	0	0	0.9	0.1	0	0
	IV1		0	0	0	0	0.9	0.1	0
	IV2		0	0	0	0	0	0.9	0.1
	V		0	0	0	0	0	0	1

(5.13)

ここで、行列中の各元の値は、列方向の遷移元の各変状レベルにある場合に対して、単位時間ステップ経過後（1年後）に元の変状レベルに留まる確率（主対角線上の各元の値 0.9 および 1）も含め、各変状レベルへ遷移する確率（ここでは、最終状態の変状レベル V を除く主対角線の右隣元の値 0.1）を行方向に表している。

(2) 状態確率ベクトルによる評価

決定した遷移確率行列 P を用いて、式 (4.16) により時点 t での状態確率ベクトル $p(t)$ が求められる。この $p(t)$ から得られる式 (5.12) 中の各要素で表される時点 t に各状態 i にある確率 $a_i(t)$ により、ライフタイムリスクの経年変化を評価した一例を以下に示す。

i) 将来の補修計画の有無による検討例

評価例として、図-5.2 に将来の補修計画の有無による検討例を比較して示す。供用開始（供用 0 年）時において変状レベル I にあるとして、初期状態ベクトルを表-5.1(a) 中に示す $p(0)$ とおいた。将来の供用期間中にお

いて、(a) は補修を行わない場合で、(b) は供用 30 年経過後の変状に対しての補修計画を想定した場合で、式 (5.13) の遷移確率行列 P を用いて、それぞれに状態確率ベクトルの経年変化を求めた。図-5.2 は、この状態確率ベクトルの各要素で表される時点 t に各状態（変状レベル） i にある確率の経年変化を示している。

(a) の補修計画無しでは、式 (4.16) から t 年後の状態確率ベクトル $p(t)$ は、初期状態ベクトル $p(0)$ や任意の x 年後の状態確率ベクトル $p(x)$ により

$$p(t) = p(0)P^t = p(x)P^{(t-x)} \quad (5.14)$$

ただし、 $x < t$

などと表される。例えば、30 年後と 50 年後の状態確率ベクトル $p(30)$ と $p(50)$ は、それぞれ図-5.2(a) の経過年数 $t=30$ 年と $t=50$ 年での各変状レベル i の状態確率 $a_i(t)$ を各要素として、表-5.1(a) 中に示す値として得られる。図-5.4(a) にその変化のようすを示す。

表-5.1 30年後補修計画の有無による50年後の状態確率ベクトルの比較例

(a) 補修計画無し

0年：変状レベル I	I	II	III1	III2	IV1	IV2	V	IV1+IV2+V
0年(初期)状態ベクトル	$p(0) = (1 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad)$							
30年後状態確率ベクトル	$p(30) = (0.042 \quad 0.141 \quad 0.227 \quad 0.236 \quad 0.177 \quad 0.102 \quad 0.073) \quad 0.33$							
50年後状態確率ベクトル	$p(50) = (0.005 \quad 0.028 \quad 0.077 \quad 0.138 \quad 0.180 \quad 0.184 \quad 0.383) \quad 0.75$							

(b) 30年後の補修計画を考慮

補修後状態確率ベクトル	$\dot{p}(30) = (0.042 \quad 0.885 \quad 0.000 \quad 0.000 \quad 0.000 \quad 0.000 \quad 0.073) \quad 0.07$							
50年後状態確率ベクトル	$\dot{p}(50) = (0.005 \quad 0.118 \quad 0.251 \quad 0.260 \quad 0.172 \quad 0.080 \quad 0.111) \quad 0.36$							

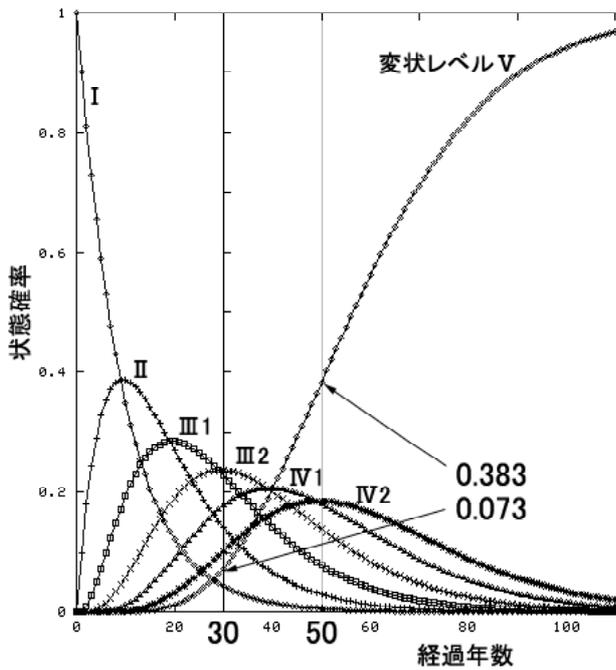
表-5.2 実際に30年経過した時点での再評価による状態確率ベクトルの比較例

(c) 実際の30年後の変状レベル III2（実際に30年経過した時点での再評価例）

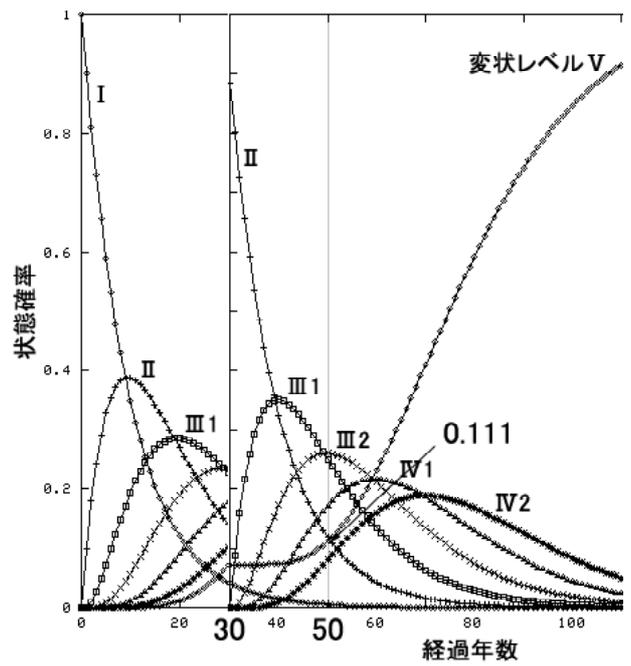
30年：変状レベル III2	I	II	III1	III2	IV1	IV2	V	IV1+IV2+V
30年後(初期)状態ベクトル	$\ddot{p}(30) = (0 \quad 0 \quad 0 \quad 1 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad) \quad 0$							
50年後状態確率ベクトル	$\ddot{p}(50) = (0 \quad 0 \quad 0 \quad 0.121 \quad 0.270 \quad 0.285 \quad 0.323) \quad 0.88$							

(d) 実際の30年後の変状レベル II（実際に30年経過した時点での再評価例）

30年：変状レベル II	I	II	III1	III2	IV1	IV2	V	IV1+IV2+V
30年後(初期)状態ベクトル	$\ddot{\ddot{p}}(30) = (0 \quad 1 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad) \quad 0$							
50年後状態確率ベクトル	$\ddot{\ddot{p}}(50) = (0 \quad 0.121 \quad 0.270 \quad 0.285 \quad 0.190 \quad 0.089 \quad 0.043) \quad 0.32$							

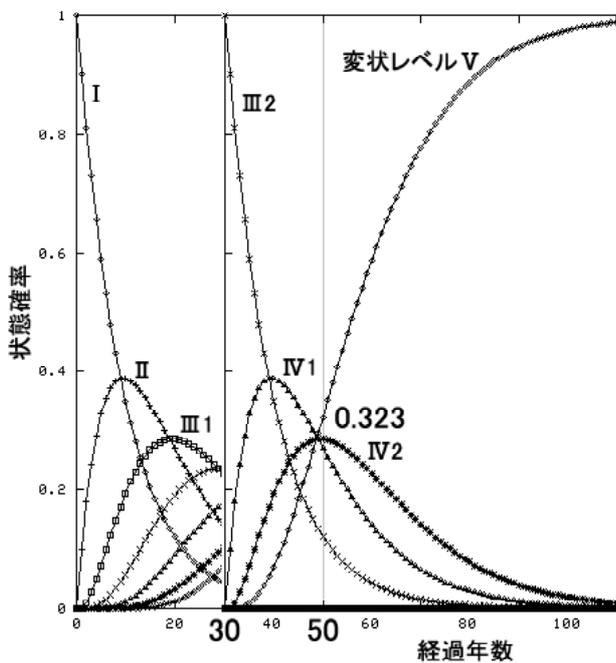


(a) 補修計画無し

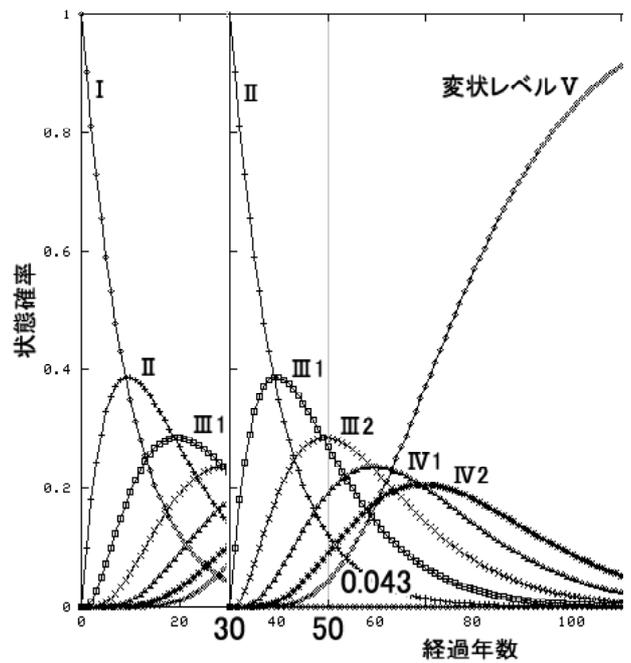


(b) 30年後の補修計画を考慮

図-5.2 状態確率ベクトルの経年変化 (補修計画の有無による評価例)



(c) 30年後の変状レベルⅢ2

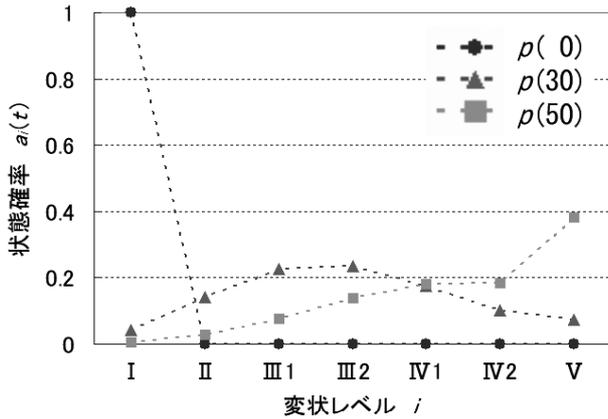


(d) 30年後の変状レベルⅡ

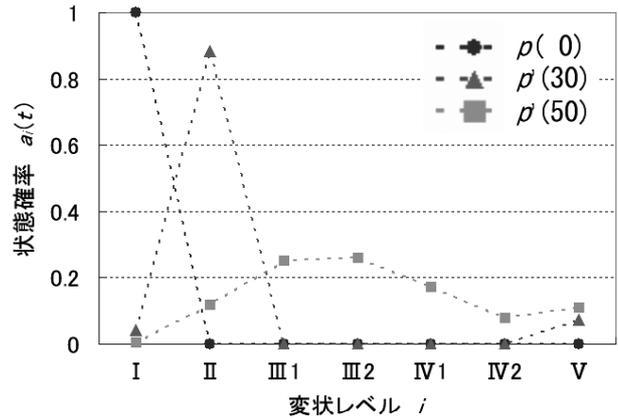
図-5.3 状態確率ベクトルの経年変化 (実際に30年経過した時点での再評価例)

一方、(b)では将来、任意の x 年後において想定状態より先の状態にあれば、補修を行うことにより想定状態まで戻すことを計画しているとする。すなわち、 x 年後

の補修前の状態確率ベクトル $p(x)$ 中各要素の状態確率の値で、想定状態以降の値の総和をあらたに想定状態での値とし、想定状態より先の値をすべて 0 として、

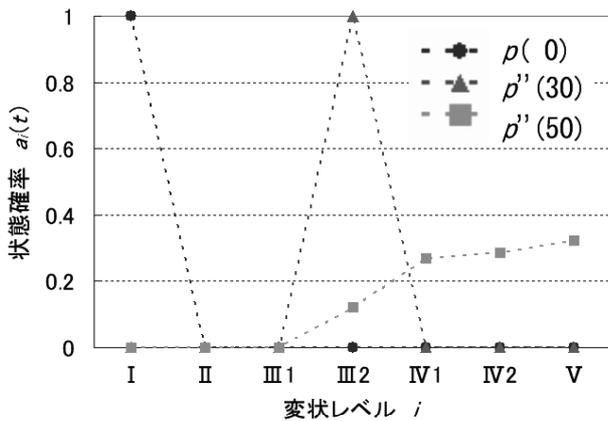


(a) 補修計画無し

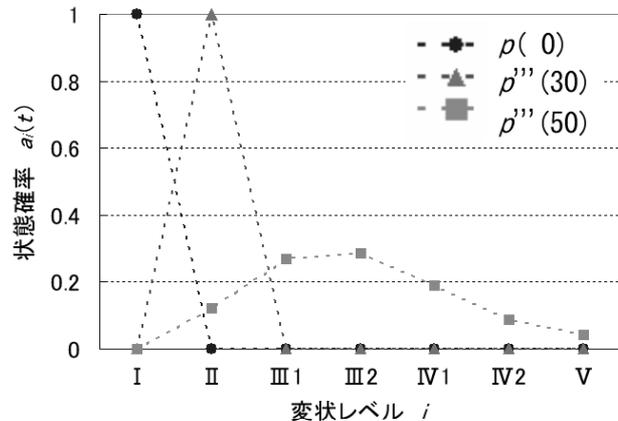


(b) 30年後の補修計画を考慮

図-5.4 状態確率ベクトルの経年変化 (補修計画の有無による評価例)



(c) 30年後の変状レベルIII2



(d) 30年後の変状レベルII

図-5.5 状態確率ベクトルの経年変化 (実際に30年経過した時点での再評価例)

補修終了時の状態確率ベクトル $\dot{\mathbf{p}}(x)$ とする。ただし、施設が破壊状態となる場合は、補修での対処は不可能であり、 $\mathbf{p}(x)$ 中最終要素の破壊状態での値は、破壊確率として $\dot{\mathbf{p}}(x)$ 中に残る。この $\dot{\mathbf{p}}(x)$ により、 x 年より先の t 年後の状態確率ベクトル $\dot{\mathbf{p}}(t)$ は、

$$\dot{\mathbf{p}}(t) = \dot{\mathbf{p}}(x) \mathbf{P}^{(t-x)} \quad (5.15)$$

ただし、 $x < t$

と表される。例えば、供用30年経過時に変状レベルIII1以降の状態にある場合、補修を行うことにより変状レベルIIの状態まで戻すことを計画していれば、表-5.1(a)中に示した補修前の状態確率ベクトル $\mathbf{p}(30)$ の各要素の状態確率の値から補修終了時の状態確率ベクトル $\dot{\mathbf{p}}(30)$ の各要素の状態確率は、それぞれ

$$a_i^{\dot{}}(30) = a_i(30)$$

$$\begin{aligned} a_{II}^{\dot{}}(30) &= a_{II}(30) + a_{m1}(30) + a_{m2}(30) \\ &\quad + a_{IV1}(30) + a_{IV2}(30) \\ a_{m1}^{\dot{}}(30) &= a_{m2}^{\dot{}}(30) = a_{IV1}^{\dot{}}(30) = a_{IV2}^{\dot{}}(30) = 0 \\ a_V^{\dot{}}(30) &= a_V(30) \end{aligned}$$

として、表-5.1(b)中に示す値となる。よって、供用30年より先の t 年後の状態確率ベクトル $\dot{\mathbf{p}}(t)$ は、

$$\dot{\mathbf{p}}(t) = \dot{\mathbf{p}}(30) \mathbf{P}^{(t-30)} \quad (5.16)$$

ただし、 $30 < t$

と表される。例えば、50年後の状態確率ベクトル $\dot{\mathbf{p}}(50)$ は、図-5.2(b)の経過年数 $t=50$ 年での各変状レベル i の状態確率 $a_i(t)$ を各要素として、表-5.1(b)中に示す値として得られる。図-5.4(b)にその変化のようすを示す。

表-5.1および図-5.2, 5.4の(a)と(b)に示した補修計

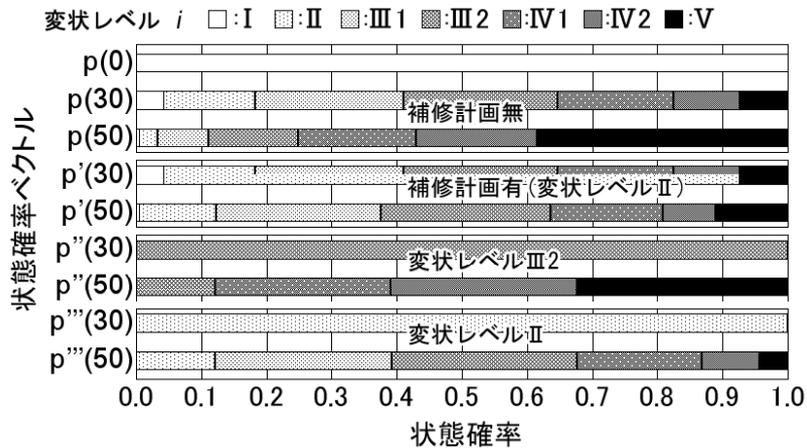


図-5.6 各状態確率ベクトルでの状態確率の分布割合

面の有無による検討例では、供用50年経過後の破壊確率は、それぞれ $a_v(50) = 0.383$ と $a_v'(50) = 0.111$ と評価された。さらに、施設破壊に至らないまでも構成材に破壊を生じる変状レベルIV1、IV2の状態確率も含めた値では、それぞれ0.75と0.36と評価された。

ii) 実際に供用年数が経過した時点での再評価例

実際に供用年数が経過したある時点での変状レベルをもとにした再評価例として、図-5.3に変状レベルの違いによる検討例を比較して示す。実際に供用30年が経過した時点で、(c)は変状レベルIII2である場合、(d)は変状レベルIIである場合として、それぞれの再評価時の初期状態ベクトルを表-5.2(c)中に示す $p''(30)$ と $p'''(30)$ とおいた。式(5.13)の遷移確率行列 P を用いて、それぞれに供用30年経過時より先の状態確率ベクトル $p''(t)$ と $p'''(t)$ の経年変化を求めた。図-5.3は、これらの状態確率ベクトルの各要素で表される時点 t に各状態(変状レベル) i にある確率の経年変化を示している。例えば、それぞれの50年後の状態確率ベクトル $p''(50)$ と $p'''(50)$ は、図-5.3(c)、(d)の経過年数 $t=50$ 年での各変状レベル i の状態確率 $a_i(t)$ を各要素として、表-5.2(c)、(d)中に示す値として得られる。図-5.5(c)、(d)にそれぞれの変化のようすを示す。

表-5.2および図-5.3、5.5の(c)と(d)に示した再評価例では、実際に供用30年が経過した時点で変状レベルIII2である場合と変状レベルIIである場合では、供用50年経過後の破壊確率は、それぞれ $a_v''(50) = 0.323$ と $a_v'''(50) = 0.043$ と評価された。さらに、施設破壊に至らないまでも構成材に破壊を生じる変状レベルIV1、IV2の状態確率も含めた値では、それぞれ0.88と0.32と評価された。

iii) 状態確率ベクトルの比較

表-5.1、5.2中に示した初期状態ベクトルおよび状態確率ベクトルの各要素で表される変状レベル i の状態確率の分布割合を図-5.6にまとめて示す。また、図-5.7に表-5.1、5.2中に示した50年後のそれぞれの状態確率ベクトルのようすをまとめて示す。

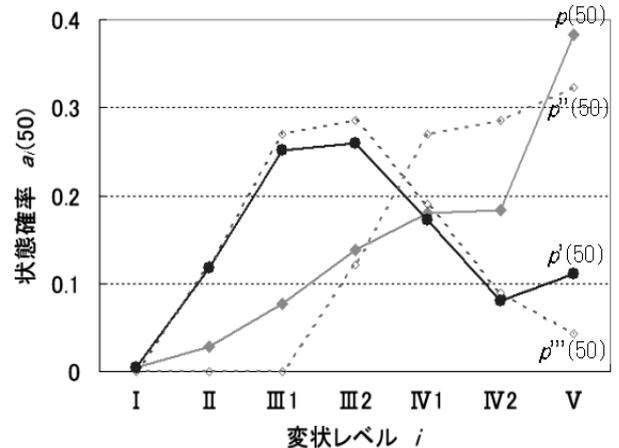


図-5.7 想定される50年後の状態確率ベクトル

$p''(50)$ と $p'''(50)$ は、破壊確率を示す変状レベルVでの状態確率の差異を除き、グラフの形状が一致している。これは、供用開始時点における補修計画で、供用30年後において、破壊状態の変状レベルVである場合を除き、補修により変状レベルIIまで戻す場合での評価による $p''(50)$ に比して、実際の供用30年経過時において変状レベルIIであった場合での再評価による $p'''(50)$ では、30年経過時までに破壊状態に至っている確率を含まない分だけ50年後の破壊確率の値が低く、また、その確度は高い。

$p(50)$ と $p''(50)$ でも、破壊確率の値に関しては、 $p'(50)$ と $p'''(50)$ と同様である。さらに、供用開始時点における評価による $p(50)$ に比して、実際の供用30年経過時において変状レベルⅢ2であった場合での再評価による $p''(50)$ では、30年経過時までに変状レベルⅢ2より前の状態確率を含まない分だけ50年後の変状レベルⅣ1, Ⅳ2の値が高い。

このように、構造物の変状レベル遷移モデルに対して、マルコフ連鎖モデルを適用することにより、遷移確率行列を設定し、求められる状態確率ベクトルから、あらかじめ時期や条件が設定された補修計画に対して、また、将来のある時期における再評価に対してなど、構造物のライフタイムリスクの経年変化を確率統計的に評価することができる。

6. 変状事象に着目した状態遷移モデルでの検討

6.1 検討対象とする変状事象

検討対象とする表法面コンクリート被覆構造の海岸保全施設について、表-3.3に示した変状レベルの各遷移パターンモデルにおいて、変状レベルⅢ2での中詰土の吸出しによる空洞化の進展が、共通の事象としてみられる。ここでは、この事象に対する構造物のライフタイムリスクを評価した。空洞化が進展すると中詰土による支持力が低下するため、天端、表法工、裏法工などの構成材に陥没や破壊を生じる可能性が増し、また、空洞化の進展過程の途中において、波力による表法工(表法面被覆コンクリート)の破壊を生じる可能性が増す。そして、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の低下や構造物としての安定性を保持できなくなり、施設全体の破壊へと至る。ここでの検討では、空洞化の進展事象の最終状態を「破壊状態」と表現し、その状態にある確率を「破壊確率」と表現する。

変状レベルの遷移パターンモデル中の検討対象事象を図-6.1に示す。また、その検討構造モデルを図-6.2に示す。

6.2 状態遷移モデルの仮定

変状レベルⅢ2の中詰土の吸出しによる空洞化の発生からその進展により構成材の破壊に至るまでの状態遷移のモデル化では、5.単純なモデルでの検討と同様に以下のような仮定を行った。

- Unit Step B Model に従う。
- 一様マルコフ連鎖モデルとする。

ここではさらに、変状レベルⅢ2で起こりうる波力による表法面被覆コンクリートの破壊事象をこのモデルに組み込んだ。図-6.3に、空洞化の進展途中での破壊事象発生を考慮した状態遷移モデルを示す。すなわち、時点 t に空洞化の進展状態 i であり、時点 $t+1$ に i にとどまる確率 p_i と次の状態 $i+1$ に遷移する確率 q_i とに加えて、時点 $t+1$ に空洞化の最終状態(破壊状態) b に遷移する確率(破壊確率) S_i を考慮して、遷移確率行列 P に組み込んだ。ここで、空洞化の最終状態の一つ前の状態 $b-1$ での破壊確率としては $q_{b-1} + S_i$ となる。

よって、空洞化の進展状態に対する遷移確率割合 γ および各遷移確率 p_i , q_i と S_i の関係は、次のように表される。

$$p_i + q_i + S_i = 1 \quad (6.1)$$

$$p_i / q_i = \gamma \quad : \text{const.} \quad (6.2)$$

$$p_i = \gamma (1 - S_i) / (1 + \gamma) \quad (6.3)$$

$$q_i = (1 - S_i) / (1 + \gamma) \quad (6.4)$$

したがって、遷移確率行列 P は、次のように表される。

$$P = \begin{pmatrix} p_1 & q_1 & 0 & 0 & \cdots & 0 & S_1 \\ 0 & p_2 & q_2 & 0 & \cdots & 0 & S_2 \\ 0 & 0 & p_3 & q_3 & \cdots & 0 & S_3 \\ 0 & 0 & 0 & p_4 & \cdots & 0 & S_4 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & p_{b-1} & q_{b-1} + S_{b-1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (6.5)$$

6.3 変状遷移評価システムの構築

図-6.3に示した中詰土の吸出しによる空洞化の進展途中での、波力による表法面の破壊発生を考慮した状態遷移モデルに対する評価フローを図-6.4に示す。

まず、検討対象とする構造モデルの諸元を設定し、波浪による作用外力や地盤からの反力などを算定するための諸条件を設定する。

次に、図-6.4中の左側に示すように、空洞化の進展事象をマルコフ連鎖モデルを用いて評価する。ここで

パターン	I	II	III1	III2	IV1	IV2	V
コンクリート劣化	コンクリート劣化 ひび割れ・剥離	構成材耐力低下	構成材(一部)損傷	中詰土吸出し・空洞化 	構成材破壊 ・陥没	構造物破壊・陥没	施設破壊
洗掘	前面海底洗掘	根固工沈下 構造物下部洗掘	基礎工沈下・損傷 構造物移動・沈下 目地開き・ずれ				
圧密	基礎地盤沈下	構造物沈下(微少)	構造物沈下 目地開き・ずれ				
波力			構成材(表法面)損傷				
越波			構成材(天端・裏法)損傷				

図-6.1 表法面コンクリート被覆構造物の変状レベル遷移パターンモデル中の検討事象

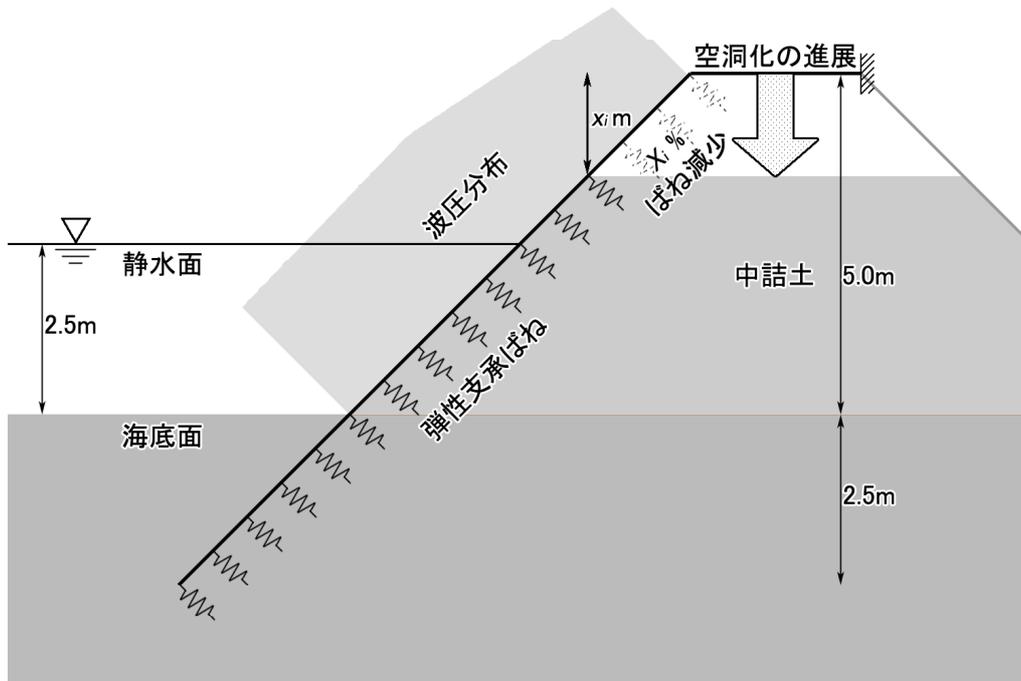


図-6.2 中詰土の空洞化進展および表法面被覆コンクリート破壊の検討構造モデル

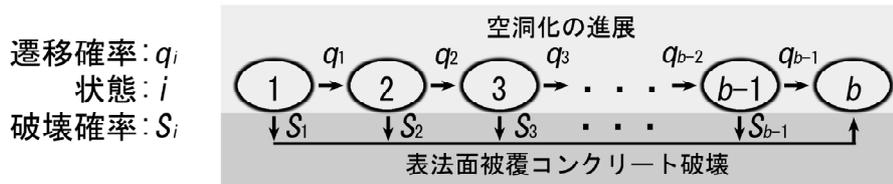


図-6.3 空洞化の進展途中での破壊事象発生を考慮した状態遷移

は、空洞化の進展状況を Unit Step B Model に従う一様マルコフ連鎖モデルで設定した。経過時間 t と状態 i を離散化し、空洞化事象の発生から最終状態に至るまでの寿命とそのばらつきを設定し、式(5.10)、(5.11)により状態数 b と状態遷移確率割合 γ を求めることにより、空洞化の状態遷移を設定する。

一方、図-6.4中の右側に示すように、表表面被覆コンクリートの限界状態を設定し、一次ガウス近似法を用いて、空洞化の進展途中の各状態 i における空洞化率 X_i で、作用する波力 F による破壊発生確率 S_i を求める。この S_i を図-6.4中左側のマルコフ連鎖モデルに組み込むため、式(6.3)、(6.4)により γ から空洞化の状態遷移確率 p_i と q_i を決定する。これらの S_i 、 p_i 、

q_i により、式(6.5)で表される遷移確率行列 P を得る。

このように得られた P と任意に想定される初期状態ベクトル $\mathbf{p}(0)$ とから、式(4.16)により各経過時点(時間ステップ) t での状態確率ベクトル $\mathbf{p}(t)$ が求められる。この $\mathbf{p}(t)$ により得られる空洞化事象の最終状態としての破壊確率 $a_b(t)$ を含む各状態確率 $a_i(t)$ から、状態遷移によるライフタイムリスクの評価を行うことができる。

さらに、一次ガウス近似法を用いた信頼性評価では、コンクリート強度、地盤反力係数、波高などの各確率変数の感度評価を行うことにより、各変数のばらつきが、破壊事象の発生確率に及ぼす影響度合いの比較検討を行うことができる。

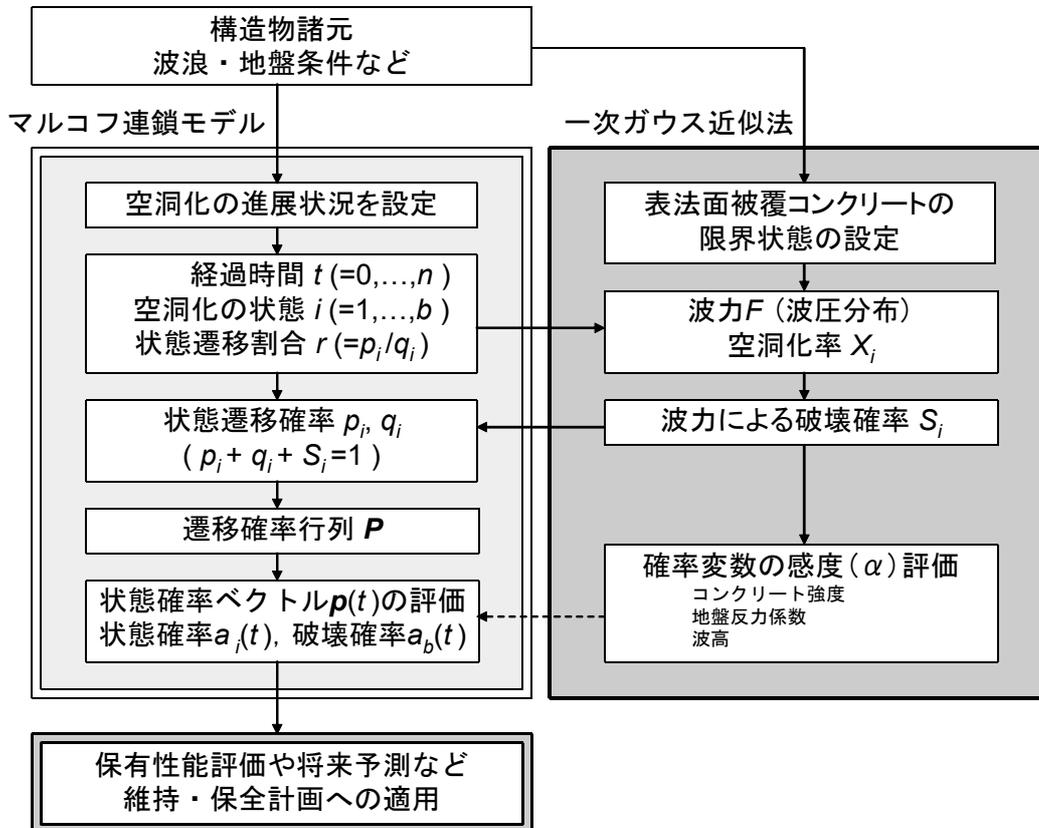


図-6.4 空洞化の進展途中での破壊事象発生を考慮した状態遷移の評価フロー

7. 変状遷移評価システムによる検討例

7.1 構造モデルの設定

図-6.2に示した二次元構造モデルを対象として、中詰土の空洞化進展状況および表法面被覆コンクリートの限界状態を設定し、空洞化の進展途中での表法面被覆コンクリートの破壊発生を考慮した状態遷移について検討した。

表法面被覆コンクリートに作用する外力は、合田式による構造物前面の波圧分布から求めた作用波力とし、反力は、中詰土および海底地盤を弾性体として弾性支承ばねにより考慮し、表法面被覆コンクリートを弾性支承上梁としてモデル化した。

構造モデルの諸元は、図-6.2中に示した各寸法諸元、海底面からの設計水深2.5m、構造物天端高5.0m、鉛直方向の根入れ深さ2.5m、および、次に示す各数値を設定した。

表法面被覆コンクリート(無筋)

設計基準強度	: $f'_{ck} = 20$ (N/mm ²)
曲げ引張強度	: $f_{ct} = f'_{ck} / 10$ (N/mm ²)
ヤング係数	: $= 25$ (kN/mm ²)
部材厚	: $H = 500$ (mm)
単位幅	: $B = 1000$ (mm)

中詰土, 海底地盤

N値	: $N = 5$
地盤の変形係数: E_0	$= 2800 N$ (kN/m ²) $= 14000$ (kN/m ²)

地盤ばねのヤング係数は、「道路橋示方書・同解説IV下部構造編」¹⁸⁾にある水平地盤反力係数の考え方に基づき算定した。水平地盤反力係数 k_H は、式(7.1)のように表される。

$$k_H = \alpha_k k_{H0} \left(\frac{B_H}{0.3} \right)^{-3/4} \quad (7.1)$$

k_H	: 水平地盤反力係数 (kN/m ³)
k_{H0}	: $(1 / 0.3) \alpha E_0$ により求められる 水平地盤反力係数 (kN/m ³)
B_H	: 換算載荷幅 (m) $= 1$ (m) の単位幅あたりとする
α_k	: 地盤反力係数の推定に用いる補正係数 $= 1.5$ を用いる
α	: 地盤反力係数の推定に用いる係数

$= 1$ を用いる

E_0 : 地盤の変形係数 (kN/m²)
 $= 14000$ (kN/m²) を用いる

ここでは、 E_0 の設定値から $k_H = 28 \times 10^3$ kN/m² と算定された。

なお、表法面の勾配は2:1および1:1として、その影響も考慮し、比較検討を行った。

7.2 波浪条件の設定

評価対象構造物の設置地点を想定し、既存の沿岸波浪外力の分布データ¹⁹⁾から設計波にかかわるデータおよび計算結果を用い、計測値に基づき波浪条件を検討し、極値統計解析により年最大波高確率分布をワイブル分布として推定した。さらに、評価対象構造物の想定設置地点ごとに波の沿岸変形を考慮した。

(1) 波浪条件

評価対象構造物の想定設置地点での波浪条件の設定は、海岸構造物の設計において用いる日本全国各地の海象外力を統一的な手法で算定および整理することを目的に作成された既往の研究結果¹⁹⁾を基に行った。設計に関する外力としては、設計波、高潮偏差、津波高が取り上げられ、日本各地におけるそれぞれのデータと統計解析結果が比較して示されている。波浪条件については、スペクトル法などを用いた波浪推算データの収集と、各地点における設計波を算定するための沖波係数の評価が行われている。

(2) 波浪の極値統計解析

海岸保全施設の変状遷移評価では、作用外力や材料特性に関する変数のばらつきの考慮が重要であり、確率統計的な評価が求められる。特に破壊発生確率の算定のように、構造物の信頼性や安全性の評価では、作用外力の最大値の評価が重要となる。波浪による海岸保全施設の破壊は高波により生じると考えられるため、その評価では高波の発生確率を求める必要がある。このような最大値の分布を推定する場合、一般的に極値統計に基づく評価が行われる。なお高波の極大値の評価は、高波の発生事象ごとのデータである極大値資料に基づくものと、1年、1ヶ月のような期間ごとの最大値である期間最大値資料に基づくものがある。ここでは、評価システムの設定条件から、年最大値の分布を推定した。

極値統計では、与えられた最大値の確率分布を求めることが問題となる。極値の分布特性は、元のデータが属する母集団の特性によって決められるが、とくに母集団の裾野の形状による影響が主となる。極値分布の特性に

については多くの検討が進められ、標本数が十分多くなった場合の分布関数は、漸近理論によっていくつかのタイプに分類されている¹⁷⁾。高波の極大値分布は、グンベル分布やワイブル分布に従うことが明らかにされている。

ここでは、確率分布関数の分布型は、次に示すようなワイブル分布とし、年最大波高の推定を行う。ある標本 $x_{(m)}$ に対する非超過確率を $F_{(m)}$ とおくと、式(7.2)の関係が得られる。

$$F_{(m)} = 1 - \exp \left[- \exp \left(- \frac{x_{(m)} - B}{A} \right)^k \right] \quad (7.2)$$

ただし、 $B \leq x_{(m)} < \infty$

ここで、 $x_{(m)}$ は極値を表す確率変量、 $F_{(m)}$ は $x_{(m)}$ の確率分布関数であり、定数 A 、 B および k は分布形を表すパラメータで、それぞれ尺度母数、位置母数、形状母数と呼ばれる。

さらに、非超過確率 $F_{(m)}$ から基準化変量 $y_{(m)}$ を式(7.3)のように定義する。

$$y_{(m)} = 1 - \exp \left[- \ln(1 - F_{(m)}) \right]^{1/k} \quad (7.3)$$

このとき、標本 $x_{(m)}$ と基準化変量 $y_{(m)}$ の関係は、式(7.4)のように表される。

$$x_{(m)} = Ay_{(m)} + B \quad (7.4)$$

また、再現期間 R と非超過確率 $F_{(m)}$ の関係は、式(7.5)のように表すことができる。

$$F_{(m)} = 1 - \frac{1}{R} \quad (7.5)$$

得られた極大値のデータからの極値分布とその母数の推定では、波浪の極値解析は合田による最小二乗法に基づく手法が一般的に用いられている²⁰⁾。その手法は、得られた標本をデータの大きさ順に並び替えて順序統計量とし、プロットングポジションの考え方に基づいて、データごとに非超過確率を割り付け、最小二乗法により母数の推定を行うものである。

ここでは、任意に想定した評価対象構造物の設置地点 a, b, c について、それぞれに沖波の再現期間 $R=50$ 年での年最大波高確率分布の尺度母数と位置母数を推定した。その結果を表-7.1に示す。なお、データ数の制

限から形状母数については、既往の研究成果¹⁹⁾に基づいて $k=1$ と設定した。

(3) 波浪条件と沿岸変形の評価

海岸保全施設の設計における波浪条件の設定では、風による沖合いでの波の発生、その発達と沿岸までの伝播と変形を考慮する必要がある。波浪推算法としては、さまざまな方法が提案されているが、近年、スペクトルの概念に基づく高精度な評価手法が実用化されてきている。一方、波の変形については、不規則波に対する波の伝播、変形を評価することが求められる。ここでは、一般的な波の設計計算手法にしたがい次のように設定した。

- i) 沖波：波が水深の影響を受けないような深海域において、波浪推算に基づき得られる波条件
- ii) 換算沖波：海底地形による波の屈折と陸地や構造物による回折の影響を考慮して、対象地点における水深の影響は除外して得られる仮想的な波条件
- iii) 設計波：水深の影響を無視することができない(波長と比較して十分に水深が小さい)ような構造物の設置位置において、浅水変形や、水深条件によっては、砕波変形の影響をも考慮して得られる波条件

波の屈折、回折による沿岸変形の評価は、従来は図表などを用いて計算されることが多かった。しかし、最近ではエネルギー平衡方程式に基づく波浪変形の計算手法が実用化されてきている。また、浅海変形については、水深と周期が与えられれば、解析的に評価することができる。さらに、構造物の設置条件によっては、砕波による変形を考慮する必要がある。

ここでは、式(7.6)で表す沿岸係数 α を用いる。

$$\alpha = K_r K_d \quad (7.6)$$

K_r : 屈折係数

K_d : 回折係数

すなわち、各地点における換算沖波波高 H_0' は、沖波波高 H_0 から α を用いて、式(7.7)により得られる。さらに、設計波高 $H_{1/3}$ は、換算沖波波高 H_0' から浅海係数 K_s を用いて、式(7.8)により得られる。

$$H_0' = \alpha H_0 \quad (7.7)$$

$$H_{1/3} = K_s H_0' \quad (7.8)$$

表-7.1 年最大波高確率分布(再現期間50年)の推定結果

対象地点	非超過確率 $F_{(m)}$	沖波波高 $H_0(m)$ 標本 $x_{(m)}$	標準化変量 $y_{(m)}$	形状母数 k	尺度母数 A	位置母数 B
a	0.98	2.29	3.912	1	0.261	1.269
b	0.98	4.50	3.912	1	0.621	2.069
c	0.98	8.50	3.912	1	0.628	6.045

表-7.2 年最大波高(再現期間50年)の算定結果

対象地点	沖波波高 $H_0(m)$	周期 $T(s)$	沿岸係数 α	浅海係数 K_s	換算沖波波高 $H_0'(m)$	設計波高 $H_{1/3}(m)$
a	2.29	4.85	0.91	0.99	2.08	2.06
b	4.50	6.70	0.76	0.93	3.42	3.18
c	8.50	15.60	0.37	1.05	3.15	3.30

検討対象地点 a, b, c における再現期間50年での年最大波高の算定結果を表-7.2に示す。ここで、沿岸係数 α は、既存の沿岸係数表¹⁹⁾から設定し、浅海係数 K_s については、簡単のため、同表中に示された設計波高と換算沖波波高との比として与えた。なお、設計波の周期は、再現期間50年の沖波の周期を用いた。

(4) 波力の算定手法

作用波力は、合田式による構造物前面の波圧分布から求めた。本来、合田式は直立壁に働く波力の算定式であり、一般的に法面に勾配のある構造物ではその影響が考慮される。富田ら²¹⁾は、ゲートの起伏角を変化させることが可能なフラップゲート模型を用いた水理実験を行った。その結果、直立あるいは港内側に 15° , 30° , 45° 傾斜するゲートに作用する波力は、いずれも合田式での算定が可能であることを明らかにした。この結果も考慮に入れ、ここでは合田式を用いた。

検討対象地点 a, b, c での、合田式による直立壁に作用する波圧分布を図-7.1に示す。図中の p_0 , p_1 , p_2 は、それぞれ構造物天端、静水面、海底面での波圧強度を示す。また、直立壁および表法面勾配 1:1, 2:1 での p_0 , p_1 , p_2 の法面直角方向成分の値を表-7.3に示す。

7.3 空洞化の状態遷移の設定

(1) 空洞化の進展速度の仮定

ここでは簡単のため、空洞化の進展状況は、中詰土と表法面被覆コンクリートとの接触面積が減少する現象として設定した。このとき構造物の単位幅あたりでの接触境界線は、法線方向に水平な直線と仮定し、図-6.2に示すように、構造物天端からの鉛直距離 x を空洞化の進展状況の評価指標とした。また、最初の状態 1 から構成材

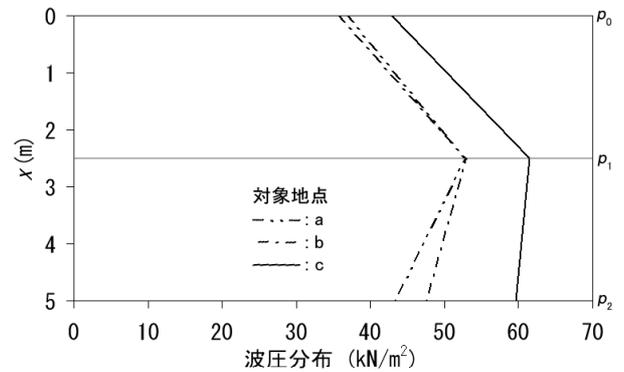


図-7.1 構造物に作用する波圧分布の算定結果

表-7.3 構造物に作用する波圧分布の算定結果

対象地点	表法面勾配	波圧強度 (kN/m ²)			波力 F (kN/m)
		p_0	p_1	p_2	
a	1:1	26.0	37.4	30.7	232
	2:1	32.9	47.3	38.8	
	(直立)	36.7	52.9	43.4	
b	1:1	25.1	37.4	33.6	236
	2:1	31.8	47.3	42.5	
	(直立)	35.5	52.9	47.5	
c	1:1	30.3	43.4	42.2	282
	2:1	38.3	54.9	53.4	
	(直立)	42.8	61.5	59.7	

表-7.4 状態分割数と状態遷移割合の設定

case	事象の寿命 T 年		状態分割数 b	状態遷移割合 γ (= p_i / q_i)
	平均 $E(T)$	分散 $Var(T)$		
1	40	(5) 4.444	37	0.111 (= 0.1 / 0.9)
2	40	(10) 10.000	33	0.250 (= 0.2 / 0.8)
3	40	(20) 19.259	28	0.481 (= 0.325 / 0.675)

の破壊状態に至る最終状態 b までの各状態 i での距離 x_i を、状態 b での距離 x_b で無次元化した接触面積の減少率 $X_i (= x_i / x_b)$ を空洞化率とした。さらに、状態 1 から状態 b に達するまでの時間 T で、 x_i あるいは X_i の減少速度 v_i あるいは V_i を一定と仮定し、空洞化の進展速度を次のように v あるいは V と設定した。

$$v = (x_b - x_i) / T = x_b / T \quad : \text{const.} \quad (7.9)$$

$$V = (X_b - X_i) / T = 1 / T \quad : \text{const.} \quad (7.10)$$

ここでは、有限要素法を用いた安定解析結果などを基に、接触境界線が静水面に達すると状態 b となると仮定し、 $x_b = 2.5$ m と設定した。

(2) 空洞化の状態分割数と状態遷移割合の算定

時間ステップを 1 年とし、空洞化進展事象中の最初の状態 1 から最終の状態 b に至るまでの遷移時間 T 年について、海岸保全施設の現地実態調査⁹⁾を実施した際の状況などから、この空洞化進展事象の寿命 T 年の平均値 $E(T) = 40$ 年を仮定した。ちなみに、5.4 の検討例では、検討対象構造物の 7 段階の変状レベル I, II, III1, III2, IV1, IV2, V を各状態 i として、状態数 7 で、その全遷移時間を 60 年程度に仮定した。また、単純化のため、その遷移速度を一定と仮定した。よって、7 段階の変状レベルすべてで、その寿命は 60/7 年程度と仮定しての検討となっている。

一方、ここでは、 T のばらつきの程度を示す分散 $Var(T)$ の値をパラメータとして、空洞化進展事象中の状態遷移状況への影響を比較検討した。 $Var(T)$ の値を 5, 10, 20 と設定し、それぞれ case 1, 2, 3 として、式(5.10), (5.11)により求められる状態分割数 b と状態遷移割合 $\gamma (= p_i / q_i : \text{const.})$ の算定値を表-7.4に示した。なお、算定された b を整数値とするため、 $Var(T)$ は、設定値 5, 10, 20 をそれぞれ表中に示す値に調整した。

7.4 波力による破壊確率の設定

(1) 表法面被覆コンクリートの限界状態の設定

実構造物においては、表法面被覆コンクリートは、鉄筋入りの場合と無筋の場合とがある。鉄筋入りの場合には、部材厚をより小さくすることが可能となり、「海岸保全施設築造基準解説」²²⁾によると、鉄筋入りの場合で最低 30 cm、無筋の場合で最低 50 cm とされている。ここでは、ひび割れに対して、より厳しい条件となる無筋コンクリートで検討した。

構造物の中詰土の吸出しなどによる空洞化が進展すると、表法面被覆コンクリートに生じる波力による曲げモーメントが増加し、やがてひび割れが発生する。これは、中詰土の保護および構造安定性においても致命的と考えられる。したがって、曲げひび割れの発生を表法面被覆コンクリートの限界状態と設定した。すなわち、表法面被覆コンクリートの法線に平行な法面直角方向断面の引張端における引張応力度(発生した曲げモーメントを断面係数で除した値)が、コンクリートの曲げ引張強度に達したときを限界状態とした。よって、波力による表法面被覆コンクリートの破壊に対する限界状態の安全性照査式は、式(7.11)で表される。

$$f_{ct} > M / Z \quad (7.11)$$

$$f_{ct} : \text{コンクリートの曲げ引張強度} \\ = f'_{ck} / 10 \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

$$f'_{ck} : \text{コンクリートの設計基準強度} \\ = 20 \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

$$M : \text{荷重により発生する最大曲げ} \\ \text{モーメント (N}\cdot\text{mm)}$$

$$Z : \text{断面係数} \\ = BH^2 / 6 \text{ (mm}^3\text{)}$$

$$B : \text{部材単位幅} \\ = 1000 \text{ (mm)}$$

$$H : \text{部材厚} \\ = 500 \text{ (mm)}$$

式(7.11)は、破壊確率を算定する際の性能関数(限界状態関数)となる。

(2) 信頼性に基づく破壊発生の考え方

始めに簡単のため、ある構造物の破壊モードにおいて、単一の構造部材に対して単一の荷重が働いたときの破壊事象の発生モデルを考える。耐力 R の分布関数を F_R 、荷重 S の分布関数を F_S とすると、耐力と荷重の確率密度関数 f_R と f_S との関係は、図-7.2に示すようになる²³⁾。

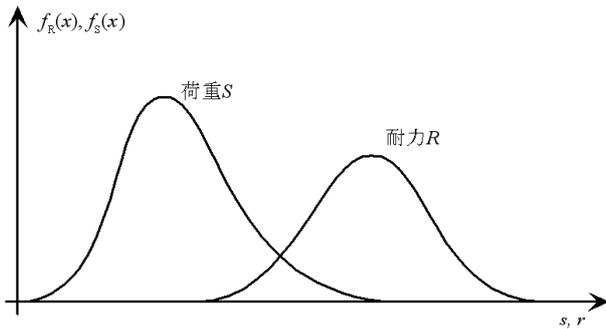


図-7.2 耐力と荷重の確率密度関数 f_R と f_S との関係

このとき、荷重 S の値が耐力 R の値を越えて破壊に達する確率 P_f は、式(7.12)のように表される。

$$P_f = P(R - S \leq 0) = \int_{-\infty}^{+\infty} F_R(x) f_S(x) dx \quad (7.12)$$

また、この条件下での信頼度 R は、荷重が作用したときに壊れずに残る確率であり、式(7.13)のように表される。

$$R = 1 - P_f = 1 - \int_{-\infty}^{+\infty} (1 - F_S(x)) f_S(x) dx \quad (7.13)$$

ここで、耐力 R と荷重 S が互いに独立な正規分布に従うと仮定すると、耐力と荷重の差 M も正規分布に従う。

$$M = R - S \quad (7.14)$$

このとき、 M の平均値を μ_M 、標準偏差を σ_M とすると、破壊確率 P_f は、式(7.15)のように表すことができる。

$$P_f = \Phi\left(\frac{0 - \mu_M}{\sigma_M}\right) = \Phi\left(\frac{\mu_S - \mu_R}{\sqrt{\sigma_S^2 + \sigma_R^2}}\right) \quad (7.15)$$

ここで、 Φ は標準正規分布関数であり、 μ_S および μ_R 、 σ_S および σ_R は、それぞれ確率変数の S と R の平均値と標準偏差である。

信頼性指標 β は、図-7.3に示すように、標準偏差 σ_M で無次元化した 0 から平均値 μ_M までの距離として定義される。

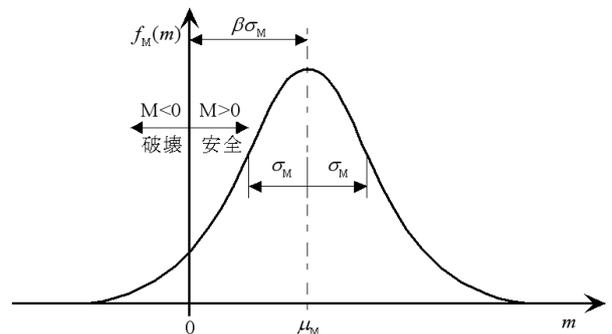


図-7.3 信頼性指標 β の定義

したがって、信頼性指標 β と破壊確率 P_f との関係は、式(7.16)のように表される。

$$P_f = \Phi\left(-\frac{\mu_M}{\sigma_M}\right) = \Phi(\beta) \quad (7.16)$$

(3) 一次ガウス近似法による定式化

ここでは、(2)で示した単純化したモデルによる信頼性評価に基づく考え方、および、基本的な評価指標の算定式を実際の破壊モードに対して定式化して示す。

構造物の破壊は一般的に、荷重 S の値が耐力 R の値を越えたとき発生する。すなわち、

$$g(X) = R - S = 0 \quad (7.17)$$

となる状態が破壊状態を表す。信頼性評価では、この関数 $g(X)$ を性能関数あるいは限界状態関数と呼ぶ。 X は、関数中の n 次元の基本変数ベクトルであり、各要素が確率変数である。信頼性設計法では、一般的に耐力 R も荷重 S も不確定性を持つため、これを確率変数として扱う。

限界状態関数は、一般的に複数の確率変数をもつ。

それらの確率変数を X_1, X_2, \dots, X_n と表せば、限界状態は、

$$M = g(X) = g(X_1, X_2, \dots, X_n) = 0 \quad (7.18)$$

と表現され、 $M < 0$ なら破壊状態、 $M > 0$ なら安全状態である。このとき、破壊確率 P_f は、式(7.19)のように表される。

$$P_f = \underbrace{\int \dots \int}_{g(X) \leq 0} f_{X_1, X_2, \dots, X_n}(x_1, x_2, \dots, x_n) dx_1, dx_2, \dots, dx_n \quad (7.19)$$

図-7.4に確率変数が2つの場合での限界状態関数のイメージを破壊曲線で示す。

この信頼性解析は、レベルⅢと呼ばれているが、少数のデータから基本変数の確率密度関数を推定するこ

とや、破壊確率を直接計算することが、一般的には困難である。そこで、これに代わり、信頼性を簡便に評価するためのレベルⅡの信頼性解析がある。

レベルⅡの信頼性解析では、基本変数の分布形を無視し、その平均値と分散を用いて評価しようとするものであり、信頼性は、信頼性指標 β により評価される。性能関数は、一般に X の非線形関数 $g(X)$ であり、 X の平均と共分散から、安全性余裕 M の平均と分散を簡単に計算するために用いられるのが、一次ガウス近似法または二次モーメント法と呼ばれる方法である。この方法では、非線形な性能関数を線形近似することにより、 M の平均と分散が容易に求められる。信頼性指標 β は、図-7.5に示すように、正規化された破壊曲線 $g(Z_R, Z_S)$ への原点からの距離で表現される。すなわち、原点からの距離が、その事象の発生頻度と対応しており、信頼性指標 β は、考えられる限界状態のうち、最も発生する可能性が高い事象における安全性を表現している。ここで、各確率変数の方向余弦 α の値は、各確率変数が信頼性指標 β の算定値に与える感度を表す。

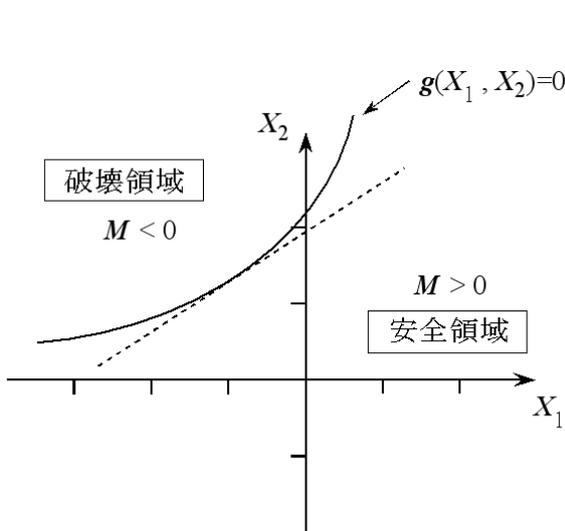


図-7.4 限界状態関数のイメージ

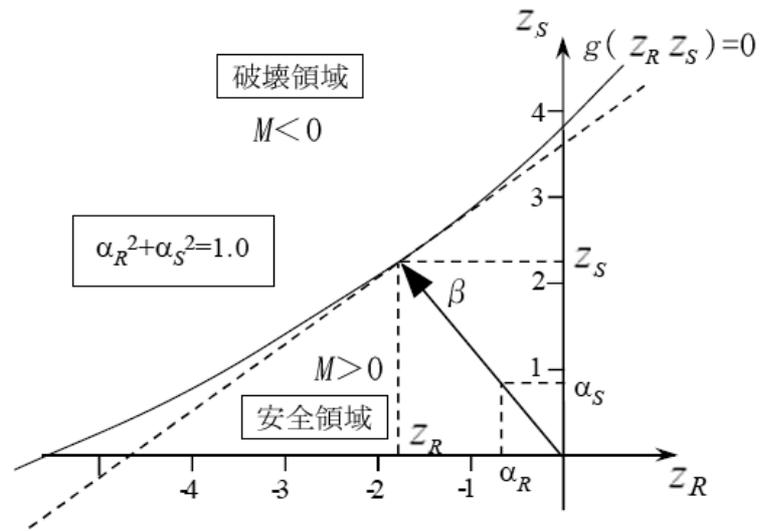


図-7.5 一次ガウス近似法での信頼性指標 β

表-7.5 確率変数の平均値と変動係数

確率変数	確率分布関数	平均値	変動係数
コンクリート設計基準強度 f'_{ck} (N/mm ²)	正規分布	20	0.1
水平地盤反力係数 k_H (kN/m ³)	正規分布	28×10^3 *	0.2

*:「道路橋示方書・同解説Ⅳ下部構造編」にある水平地盤反力係数の考え方に基づき算定

(4) 確率変数の設定

前述の7.3で設定した空洞化の状態遷移, および, ここで設定する波力による破壊発生確率では, 材料特性, 地盤特性, さらに波浪条件などの変数について, ばらつきを考慮した確率変数として取り扱った.

ここでは, 破壊発生確率に与える影響の大きい確率変数として, コンクリート強度, 地盤反力係数, 沖波有義波高を考慮した. 沖波有義波高の確率分布関数は, 前述の7.3で示したワイブル分布を用い, 沖波評価地点ごとの形状母数, 尺度母数, 位置母数は, 表-7.1に示したとおりである. コンクリート強度と地盤反力係数の確率分布関数は, 正規分布を用い, それらの平均値と変動係数は, 表-7.5に示すとおりである.

(5) 波力による破壊確率の算定

前述の7.3で空洞化の状態遷移を評価する指標として設定した空洞化率 X の変化に対して, 空洞化進展途中での波力による表法面被覆コンクリートの破壊発生確率を(3)で示した一次ガウス近似法により算定し, その応答のようすを検討した. また, 各確率変数の感度評価を行い, 変数のばらつきが破壊発生確率に与える影響の度合いを比較した. すなわち, 線形フレーム解析において $g(x) = 0$ となる節点の発生を限界状態とし, FORM (First Order Reliability Method) による信頼性解析結果から, 正規化した限界状態関数の信頼性指標 β を求め, 標準正規分布の累積分布関数の値を破壊発生確率 S として得た. また, 同時に各確率変数の感度係数 α を得た.

前述の7.3で設定した中詰土と表法面被覆コンクリートとの接触境界線の鉛直低下量 x_m , あるいは, 空洞化率 $X\%$ (ここでは百分率で表示) の変化に対して, 波力による表法面被覆コンクリートの破壊発生確率 S を算定

した結果を表-7.6に示した. 作用する波力は, 表-7.3に示した検討対象地点ごとの表法面勾配2:1と1:1との場合での波圧分布で与えた. また, 接触境界線の鉛直低下量 x_m の変化に対する破壊発生確率 S の応答のようすを図-7.6に示した. (a)に対象地点 a, b について, (b)に対象地点 c について, さらに, (c)は S を対数化し, すべての検討対象地点について示した.

空洞化の進展に対して, 波力による表法面被覆コンクリートの破壊発生確率 S は, 指数関数的に上昇した. なお, 今回の検討モデルでは, 空洞化が進展することにより構造物としての安定性確保が厳しくなる状態として, 接触境界線の鉛直低下量 x_m が, 計画水位(図-6.2中に示す静水面) $x = 2.5\text{ m}$ に達したときを想定し, そのときを空洞化率 $X = 100\%$ としている.

空洞化率 $X = 100\%$ での波力による破壊発生確率 S は, 対象地点 c では, 表法面勾配2:1および1:1でそれぞれ3.4%および1.9%となった. これに比して, 対象地点 a, b では, その値は小さく, 空洞化が進展しても波力により表法面被覆コンクリートに破壊が発生することは, ほとんど無いといえる.

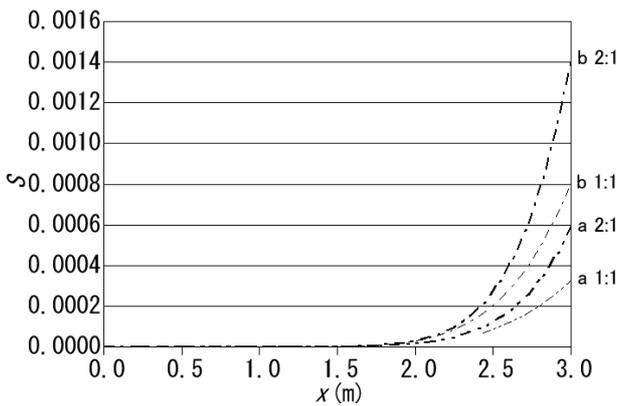
また, いずれの対象地点においても, 表法面勾配2:1に比して1:1で, 波力による破壊発生確率 S は低く評価された. ただし, その差異は, 対象地点の違い, すなわち, 作用する波力の違いによるほど顕著ではなかった.

(6) 確率変数の感度評価

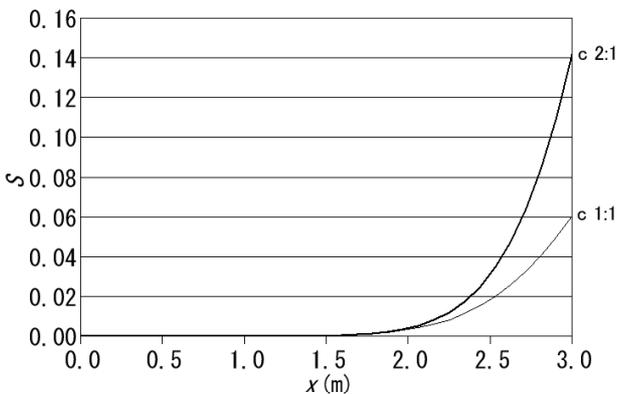
コンクリート設計基準強度 f'_{ck} , 水平地盤反力係数 $k_{\#}$ と沖波の有義波高 $H_{1/3}$ の各確率変数の感度評価を行い, 変数のばらつきが波力による表法面被覆コンクリートの破壊発生確率 S に与える影響の度合いを比較した.

表-7.6 波力による表法面被覆コンクリートの破壊発生確率の算定結果

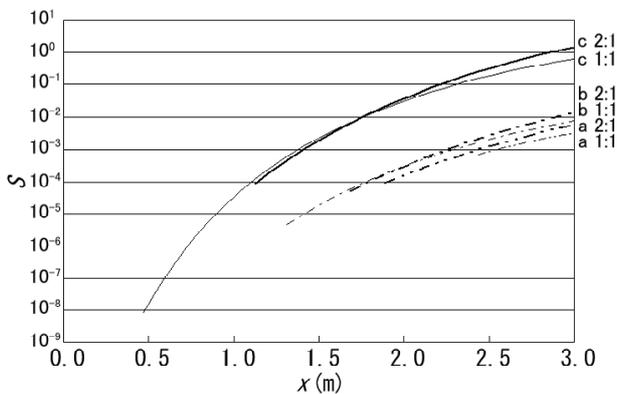
接触境界線の低下量 $x(m)$	空洞化率 $X(\%)$	破壊確率 S					
		対象地点a		対象地点b		対象地点c	
		勾配2:1	勾配1:1	勾配2:1	勾配1:1	勾配2:1	勾配1:1
0	0						
0.5	20						0.00000
1.0	40					0.00000	0.00001
1.5	60	0.00000		0.00000	0.00000	0.00019	0.00023
2.0	80	0.00001	0.00000	0.00003	0.00003	0.0033	0.0028
2.5	100	0.00014	0.00009	0.00031	0.00022	0.034	0.019
3.0	120	0.00058	0.00033	0.0014	0.00080	0.14	0.060



(a) 対象地点 a, b



(b) 対象地点 c



(c) 破壊発生確率 S を対数表示

図-7.6 空洞化の進展に対する
波力による破壊発生確率の応答

ここでは、破壊発生確率 S の増加状況が、もっとも顕著な対象地点 c での表法面勾配 2:1 について、接触境界線の鉛直低下量 x m あるいは空洞化率 X % の変化に対する各確率変数の感度係数 α を算定した結果を表-7.7 に示す。ただし、沖波の有義波高 $H_{1/3}$ の感度係数 α の値は、絶対値で示している。また、接触境界線の鉛直

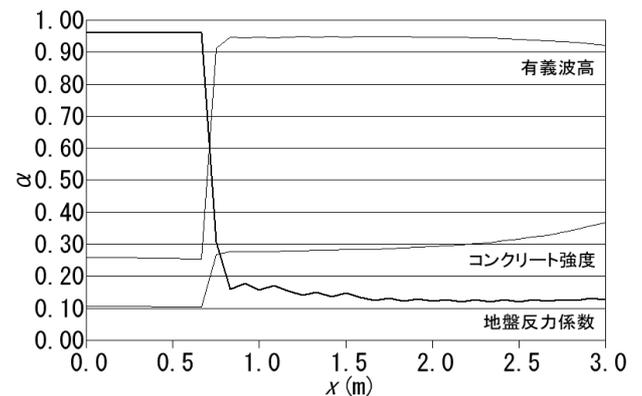
低下量 x m の変化に対する各確率変数の感度係数 α の応答の様子を図-7.7 に示した。

表-7.7 確率変数の感度係数の算定結果

(対象地点 c, 表法面勾配 2:1)

有義波高 $H_{1/3}$ の感度係数 α の値は絶対値

接触境界線の 低下量 x (m)	空洞 化率 X (%)	感度 α		
		コンクリート強度	地盤反力係数	有義波高
0	0	0.106	0.960	0.259
0.5	20	0.105	0.961	0.256
1.0	40	0.278	0.158	0.948
1.5	60	0.283	0.147	0.948
2.0	80	0.293	0.122	0.948
2.5	100	0.316	0.120	0.941
3.0	120	0.368	0.128	0.921



有義波高 $H_{1/3}$ の感度係数 α の値は絶対値

図-7.7 空洞化の進展に対する感度係数の応答
(対象地点 c, 表法面勾配 2:1)

表-7.7 および図-7.7 から、接触境界線の鉛直低下量 0.75 m、空洞化率 30 % 近傍を境に、各感度係数 α の値が変化していることがわかる。空洞化率 X が小さいときの感度係数 α の値は、水平地盤反力係数 k_H では 0.96 となり、コンクリート設計基準強度 f'_{ck} の 0.1 程度および沖波の有義波高 $H_{1/3}$ の -0.26 程度に比べて大きかった。ここで、空洞化率が小さい場合は、表法面被覆コンクリートの破壊が、海底面に近い部分で生じる。このような破壊の発生状況においては、水平地盤反力係数 k_H の影響が大きい。一方、空洞化率 X が 30 % 程度にまで進展すると、表法面被覆コンクリートの破壊は、

中詰土との接触境界線で発生する。このような破壊の発生状況においては、水平地盤反力係数 k_H の影響は小さくなり、感度係数 α の値は、沖波の有義波高 $H_{1/3}$ で -0.95 程度と大きくなった。また、コンクリート設計基準強度 f'_{ck} でも 0.3 程度に増加した。したがって、空洞化がある程度進展した状態では、破壊発生確率に対する波高の影響が大きく、沖波の有義波高 $H_{1/3}$ のばらつきを適切に評価する必要性が高いことが明らかになった。

7.5 変状遷移評価システムによる評価

表-7.4 で示したように設定した空洞化の状態遷移割合 γ と、表-7.6 および図-7.6 で示したように算定した波力による表法面被覆コンクリートの破壊発生確率 S_i とから、式 (6.3), (6.4) により空洞化の状態遷移確率 p_i, q_i を求めた。これらの p_i, q_i および S_i を式 (6.5) で表されるマルコフ連鎖モデルの遷移確率行列 P に組み込んだ。このように得られた P に、空洞化の最初の状態を初期状態ベクトル $p(0)$ で表し、式 (4.16) により状態確率ベクトル $p(t)$ の経年変化を求めた。このように求めた $p(t)$ 中の各要素として得られる、空洞化進展事象中の破壊確率 $a_b(t)$ を含む、各状態確率 $a_i(t)$ により、空洞化進展の状態遷移に対するライフタイムリスクの評価を行った。

(1) 遷移確率行列の決定

一例として、空洞化進展の状態遷移 case 2, 波力による表法面被覆コンクリートの破壊発生確率 S_i の評価対象地点 c, 表法面勾配 2:1 での遷移確率行列 P を式 (7.20) に示す。

ここで、行列中の各元の値は、列方向の遷移元の各状

態 i にある場合に対して、単位時間ステップ経過後 (1 年後) に元の状態 i に留まる確率 (主対角線上の各元の値) も含め、各状態 i へ遷移 (式 (7.20) では、最終状態 $b=33$ を除く主対角線の右隣元へ遷移、および最終状態 $b=33$ へ遷移) する確率を行方向に表している。

(2) 状態確率ベクトルによる評価

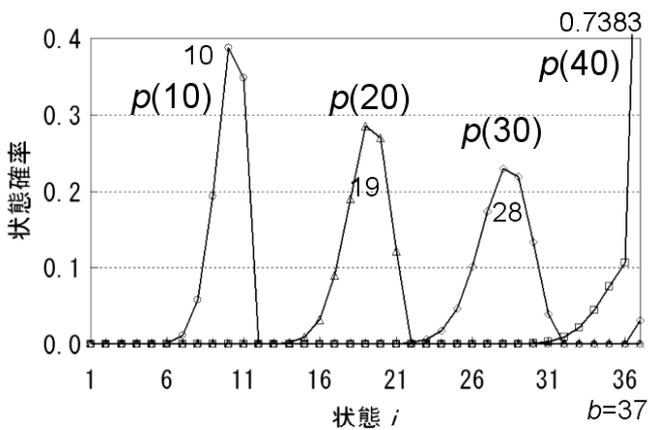
初期状態ベクトル $p(0)$ を式 (7.21) に示すようにおき、式 (4.16) により状態確率ベクトル $p(t)$ の経年変化を求めた。図-7.8 に空洞化進展の経過時間 $t = 10, 20, 30, 40$ 年での、それぞれの状態確率ベクトル $p(t)$ のようすをその各要素で表される各状態確率 $a_i(t)$ で示した。

式 (7.20) で示した遷移確率行列 P での評価結果は、図-7.8 (b) となった。この (b) に対して、(a) と (c) は、それぞれ空洞化進展の状態遷移 case 1 と case 3, (d) と (e) は、それぞれ波力による表法面被覆コンクリートの破壊発生確率の評価対象地点 a と b, (f) は、表法面勾配 1:1 と異なる場合で、それぞれの場合について遷移確率行列 P を決定し、初期状態ベクトル $p(0)$ を式 (7.21) に示すようにおき、式 (4.16) により状態確率ベクトル $p(t)$ の経年変化を求めた評価結果である。なお、それぞれの場合とも $p(40)$ では、最終状態 b での状態確率 (破壊確率) $a_b(40)$ の値を図の右上に示している。ちなみに、平均寿命の設定値は 40 年である。また、各 $p(t)$ 中で状態確率 $a_i(t)$ の値がピークとなる状態 i を図中に記している。

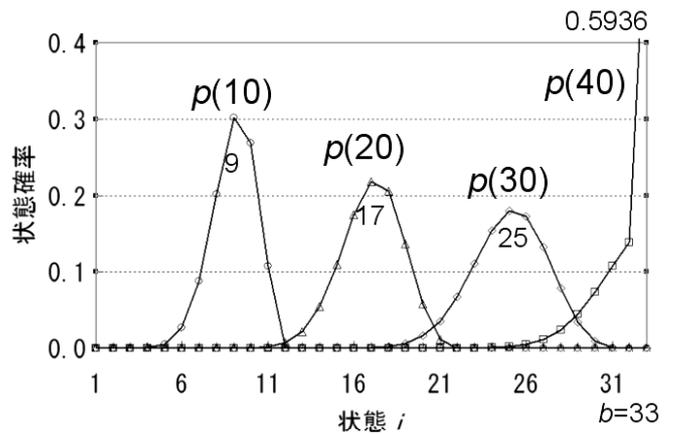
いずれの図においても、各 $p(t)$ を表す $a_i(t)$ のグラフ形状は、時間経過に伴い空洞化が進展すると、 $a_b(t)$ を除くピーク値が低くなり、状態の範囲を示す裾野が広がる。

$$\begin{matrix}
 & & & & & & & \text{遷移先の状態 } i & & & & & & & \\
 & & & & & & & 1 & 2 & 3 & \dots & 16 & 17 & 18 & \dots & 29 & 30 & 31 & 32 & 33 \\
 \begin{matrix}
 \text{元} \\
 \text{の} \\
 \text{状} \\
 \text{態} \\
 i
 \end{matrix}
 & P = & \begin{pmatrix}
 1 & 0.20000 & 0.80000 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 2 & 0 & 0.20000 & 0.80000 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 \vdots & \vdots \\
 16 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0.20000 & 0.79999 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.00001 \\
 17 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0.19999 & 0.79998 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.00003 \\
 18 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0.19999 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.00005 \\
 \vdots & \vdots \\
 29 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0.19816 & 0.79262 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0.79262 & 0 & 0 & 0 & 0.00922 \\
 30 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0.19745 & 0.78980 & 0 & \dots & 0 & 0.19745 & 0.78980 & 0 & 0 & 0.01275 \\
 31 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0.19654 & 0.78617 & \dots & 0 & 0 & 0.19654 & 0.78617 & 0 & 0.01729 \\
 32 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0.19530 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0.19530 & 0.80470 & 0 \\
 33 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1
 \end{pmatrix}
 \end{matrix} \tag{7.20}$$

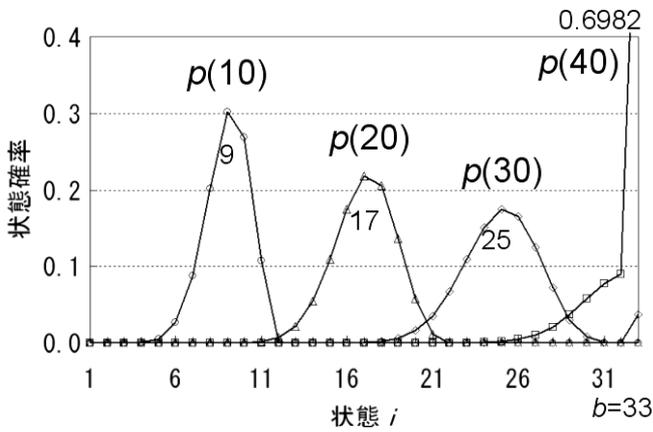
$$\begin{matrix}
 \text{状態 } i & 1 & 2 & 3 & \dots & 16 & 17 & 18 & \dots & 29 & 30 & 31 & 32 & 33 \\
 p(0) = & (1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0)
 \end{matrix} \tag{7.21}$$



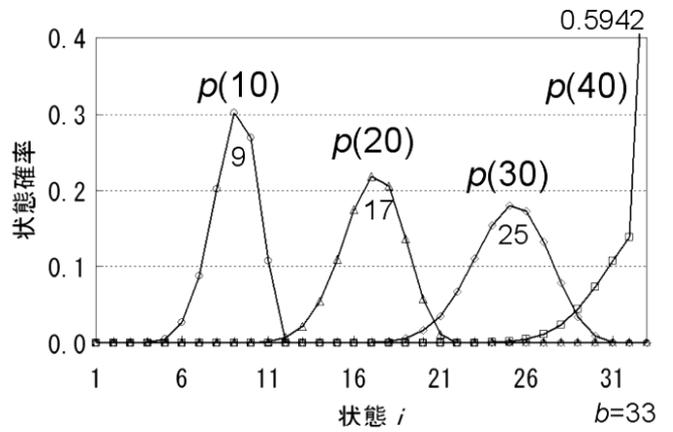
(a) 状態遷移 case 1, 対象地点 c, 表法面勾配 2 : 1



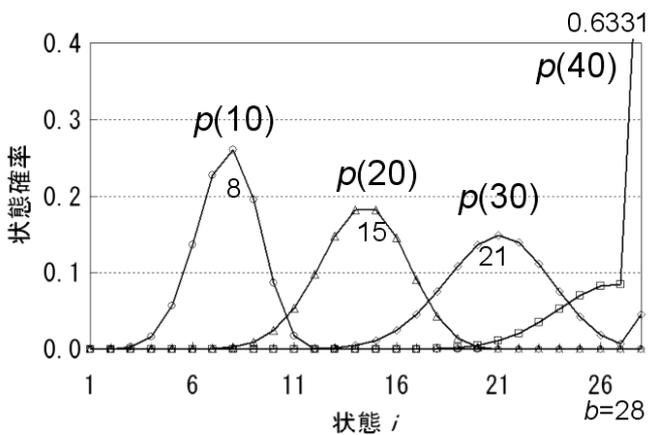
(d) 状態遷移 case 2, 対象地点 a, 表法面勾配 2 : 1



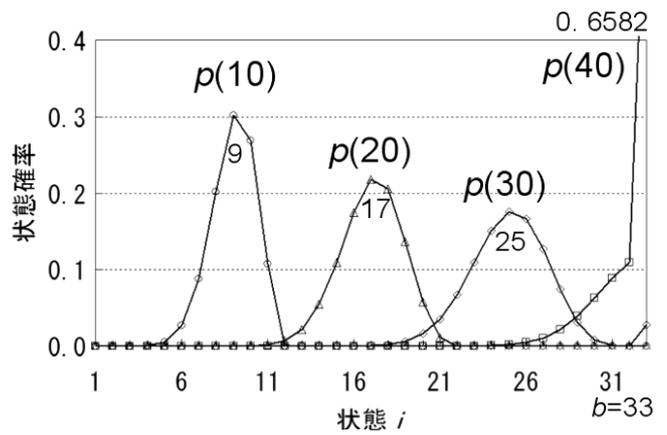
(b) 状態遷移 case 2, 対象地点 c, 表法面勾配 2 : 1



(e) 状態遷移 case 2, 対象地点 b, 表法面勾配 2 : 1



(c) 状態遷移 case 3, 対象地点 c, 表法面勾配 2 : 1



(f) 状態遷移 case 2, 対象地点 c, 表法面勾配 1 : 1

図-7.8 状態確率ベクトルの経年変化

空洞化進展の状態遷移の設定を変えての比較では、(a) case 1, (b) case 2, (c) case 3 の順, すなわち、空洞化進展事象の寿命を設定する際に、その平均値のばらつきが小さいほど、同じ経過時間での各 $p(t)$ を表す $a_i(t)$ のグラフ形状は、ピーク値が高くなり裾野が狭まる。

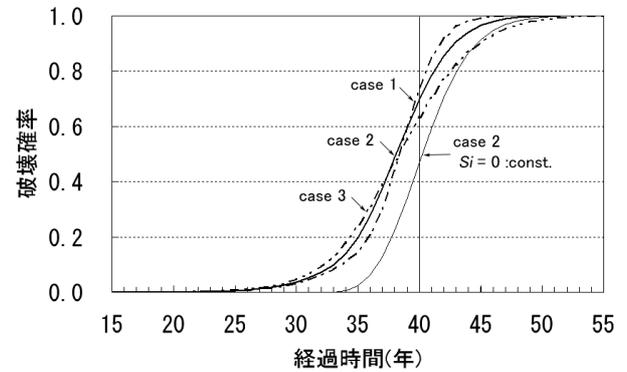
作用波力の設定を変えての比較では、(d) 評価対象地点 a, (e) 評価対象地点 b, (b) 評価対象地点 c のいずれの場合も、波力による表法面被覆コンクリートの破壊発生確率 S_i が現れない経過時間においては、各 $p(t)$ を表す $a_i(t)$ のグラフ形状は同じである。また、(d) 評価対象地点 a と (e) 評価対象地点 b では、作用波力がほぼ等しいため、 S_i が現れた後の経過時間においても、グラフ形状にほとんど差異が見られない。これらに比して、作用波力が大きい (b) 評価対象地点 c では、 S_i が現れた後の経過時間での $p(30)$, $p(40)$ で $a_b(30)$, $a_b(40)$ の値が大きい。

表法面勾配を変えての比較では、(b) 2:1, (f) 1:1 のいずれの場合も、波力による表法面被覆コンクリートの破壊発生確率 S_i が現れない経過時間においては、各 $p(t)$ を表す $a_i(t)$ のグラフ形状は同じである。 S_i が現れた後の経過時間での $p(30)$, $p(40)$ では、表法面勾配が急な (b) 2:1 のほうが、 $a_b(30)$, $a_b(40)$ の値が大きい。

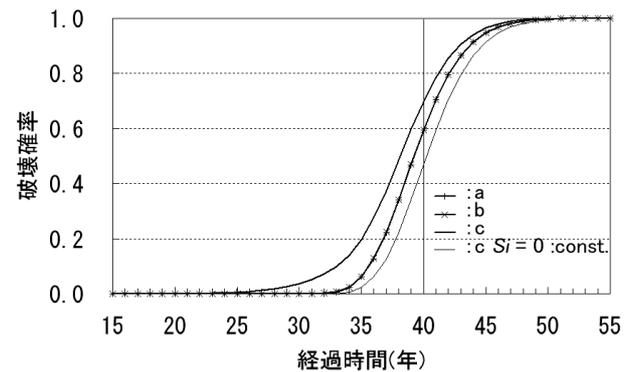
図-7.9に、空洞化進展の経過時間 t 年での、それぞれの状態確率ベクトル $p(t)$ の最終要素として得られる破壊確率 $a_b(t)$ の応答を、各設定の違いによる差異を比較して示した。(a)には、対象地点 c, 表法面勾配 2:1 で、状態遷移の設定の違いに対する評価結果を比較して示した。(b)には、状態遷移 case 2, 表法面勾配 2:1 で、作用波力の違いに対する評価結果を比較して示した。(c)には、状態遷移 case 2, 対象地点 c で、表法面勾配の違いに対する評価結果を比較して示した。また、(a)中と(b)中とには、波力による表法面被覆コンクリートの破壊発生確率 S_i が、いずれの状態 i においても 0 の場合での評価結果も示している。

(a)の状態遷移の設定の違いに対する評価結果の比較では、case 1, case 2, case 3 の順, すなわち、空洞化進展事象の寿命を設定する際に、その平均値のばらつきが小さいほど、破壊確率 $a_b(t) = 0.5$ での変曲点における勾配が急であり、最小曲率半径の小さい関数特性を示した。また、 $S_i = 0$ での評価例を除く、いずれの設定においても $a_b(t)$ の値は、経過時間 t が 25 年以下で 0, 50 年以上で 1 とみなせる程度に漸近した。

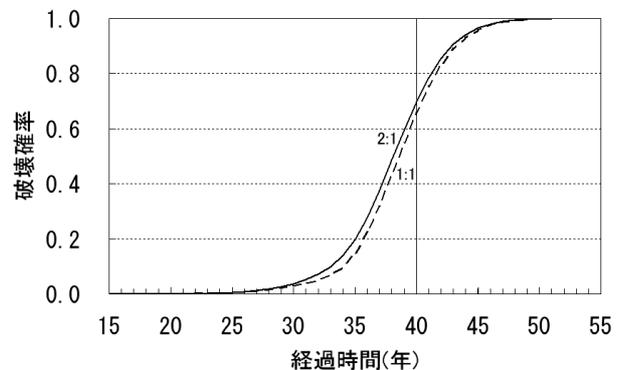
(b)の作用波力の違いに対する評価結果の比較では、評価対象地点 a と b とでは、作用波力がほぼ等しいため、グラフ形状にほとんど差異が見られなかった。これらに比して、作用波力が大きい評価対象地点 c では、経過



(a) 状態遷移の設定の違いによる比較
(対象地点 c, 表法面勾配 2:1)



(b) 作用波力の違いによる比較
(状態遷移 case 2, 表法面勾配 2:1)



(c) 表法面勾配の違いによる比較
(状態遷移 case 2, 対象地点 c)

図-7.9 破壊確率の経年変化

時間の比較的早くから、波力による表法面被覆コンクリートの破壊発生確率 S_i による増分が、破壊確率 $a_b(t)$ の値に現れた。すなわち $a_b(t)$ の値は、評価対象地点 a と b, および S_i を考慮しない設定 ($S_i = 0$; for all i) での評価対象地点 c では、経過時間 t が 33 年以下で 0, これに対し、 S_i を考慮した評価対象地点 c では、25 年以下で 0 とみなせる程度に漸近した。

(c) の表法面勾配の違いに対しての評価結果の比較では、破壊確率 $a_b(t)$ の現れる経過時間、および、その値が 1 に至る経過時間は同程度であり、 $a_b(t)$ の増加する経過時間内においては、表法面勾配 2:1 での値が、1:1 での値よりやや大きくなった。

7.6 考察

構造物内部の空洞化進展事象の平均寿命とそのばらつきから状態遷移状況を設定し、ばらつきの差異による状態遷移への影響を比較した。その結果、設定の確からしさの状態遷移評価への影響を確認できた。

波力による表法面被覆コンクリートの破壊発生確率の評価において、作用外力としての波圧を求める際の波浪条件の設定では、検討対象地点を想定し、既往の調査検討結果を基に、極値統計解析による沖波の推算と沿岸浅水変形の考慮を行った。その結果、波浪条件の設定方法、および、その設定条件での作用波力の差異により現れる、構造物内部の空洞化事象進展に対する破壊発生確率への影響が明らかとなった。

検討対象とした構造モデルでは、表法面勾配を 2:1 と 1:1 として、表法面被覆コンクリートの破壊発生確率の差異を比較した。その結果、表法面勾配の差異は、コンクリートの全長、および、合田式により仮定した波圧分布の作用範囲に影響し、破壊発生確率の値は、表法面勾配 2:1 のほうが 1:1 より大きくなった。

検討対象構造物での変状遷移の特性について、構築した評価システムによる試算によって明らかとなった事項を以下に整理する。

任意に想定した波浪条件の異なる 3 地点での比較では、相対的に波浪条件の穏やかな 2 地点と厳しい 1 地点との間で、波力による表法面被覆コンクリートの破壊発生確率に差異が見られた。また、とくに構造物内部の空洞化がある程度進展した状態では、波浪条件が破壊発生確率に与える影響が、顕著となることも明らかとなった。検討対象地点での適切な波浪条件の設定は、構造物の変状遷移の評価において、重要な要素となることが確認できた。

構造物内部の空洞化進展事象中において、その初期状

態での表法面被覆コンクリートの破壊発生確率は低く、状態遷移に伴い増大することがわかった。また、表法面被覆コンクリートの破壊が発生する箇所は、空洞化進展事象中の初期状態では、海底面付近であり、その発生確率は地盤反力の影響が大きく、ある程度、空洞化が進展した状態では、破壊発生箇所は、中詰土との接触境界線へ移り、その発生確率は波力の影響が大きいが明らかとなった。

今回の検討全般において与えた計算条件では、構造物内部の空洞化が進展する事象自体によって破壊状態に至る確率 p_{b-1} に比べて、波力による表法面被覆コンクリートの破壊発生確率 S_i が、有意となることを示した。よって、構造物の変状遷移を適切に評価するために、空洞化進展事象中での波力による破壊発生確率を適切に評価することが重要と確認された。

8. まとめ

本研究では、海岸保全施設の変状遷移を評価するための解析手法の開発を目的として、確率統計的手法の適用を図ってきた。表法面コンクリート被覆構造の海岸保全施設を対象として変状の分析を行い、その遷移を適切に表す手法として、マルコフ連鎖モデルを用いた評価システムを構築した。とくに、中詰土の吸出しによる空洞化の進展事象中での状態遷移と、同事象中に波力によって発生する表法面被覆コンクリートの破壊事象に着目し、それらの遷移確率と発生確率に対して、マルコフ連鎖モデルの適用を図った。また、表法面被覆コンクリートの破壊発生確率の評価には、一次ガウス近似法を用い、波浪条件や構造物諸元のばらつきを考慮した検討を可能とした。さらに、実構造物の変状特性の評価を目標に、既往の研究成果を基にして、波浪条件の評価手法に極値統計手法の適用と沿岸変形の考慮を行い、任意に想定した検討対象地点に対する波浪条件を設定した評価モデルでの検討を行った。また、空洞化進展事象自体によって破壊状態に至る確率、および、波力による表法面被覆コンクリートの破壊発生確率、さらには、これらの変動特性についても試算による検討を行った。

得られたおもな成果を以下にまとめる。

i) 表法面コンクリート被覆構造の海岸保全施設での変状事象として、中詰土の吸出しによる空洞化の進展は、破壊確率への影響が大きく、その進展状況の適切な設定および評価が重要である。とくに、空洞化の進展に伴い、波力による表法面被覆コンクリートの破壊発生確

率が高くなるため、空洞化進展事象中に波力によって発生する表法面被覆コンクリートの破壊事象を考慮した評価手法の開発が重要である。

ii) 上記のような評価を可能とする解析手法として、空洞化の状態遷移確率と波力による表法面被覆コンクリートの破壊発生確率とを組み込んだマルコフ連鎖モデルに基づく評価システムを構築した。また、試算結果から、構築した評価システムにより、検討対象構造物での変状を適切に表せることが確認できた。

iii) 空洞化の進展に伴い、波力による表法面被覆コンクリートの破壊発生確率の増大は顕著であり、供用期間が長くなると、空洞化進展事象自体によって破壊状態に至る確率に、波力による表法面被覆コンクリートの破壊発生確率が重なり、破壊確率が増大することが明らかとなった。また、波浪条件が、表法面被覆コンクリートの破壊発生確率に及ぼす影響が大きいことが、定量的に確認できた。

iv) コンクリート被覆構造の海岸保全施設での各変状事象が、その破壊確率に及ぼす影響の大きさは、構造物諸元、波浪条件、地盤条件などの多くの変量、また、そのばらつきなどにより大きく変化し、定量的な判断が難しい。本研究によって構築したシステムは、今後の維持管理計画の有効なツールになると考えられる。

9. あとがき

本研究は、評価システムの構築とそれを用いた評価をおもな目的としており、外力条件や変状の進展状況については、依然としていくつかの仮定のうえに計算を行っている。今後、より多くのデータや研究成果の調査検討を行い、得られた成果を取り込んでいくことによって、構築した評価システムの実用化を図ることが可能と考えられる。例えば、最近になって堤体盛土の吸出しのメカニズムについては、とくに研究が進められ、有用な知見も得られている。今後は、この吸出しのメカニズムに関する知見を空洞化進展事象のモデルに取り入れたりするなど、実際の状態をより反映した評価システムを構築する必要がある。また、さまざまな変状事象や補修などによる変状の回復事象を取り込むことにより、対象構造物の維持管理への適用を図ることが可能になると考えられる。さらには、維持管理に係わるデータの収集とモデル化も、今後の課題であると考えられる。

(2006年2月10日受付)

参考文献

- 1) Bogdanoff, J. L. and F. Kozin: Probabilistic Models of Cumulative Damage, John Wiley & Sons, New York, 341p., 1985年
- 2) 藤本由起夫, 出口章生, 岩田光正: 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., 1989年
- 3) 武山泰, 嶋田洋一, 福田正: マルコフ連鎖モデルによるアスファルト舗装の破損評価システム, 土木学会論文集, Vol. 420/V-13, pp. 135-141., 1990年
- 4) 高橋利恵, 濱本卓司: マルコフ過程を用いた構造物の確率論的損傷予測モデル, JCOSSAR '91論文集, pp. 37-41., 1991年
- 5) 鈴木基行, 秋山充良, 山崎康紀, 松中亮治, 土井充: 信頼性理論に基づくRC橋梁システムの地震時安定性評価法, 土木学会論文集, Vol. 648/V-47, pp. 9-21., 2000年
- 6) 小牟禮建一, 濱田秀則, 横田弘, 山路徹: RC栈橋上部の塩害による劣化進行モデルの開発, 港湾空港技術研究所報告, Vol. 41, No. 4, 37p., 2002年12月
- 7) 小牟禮建一, 濱田秀則, 横田弘, 山路徹: RC栈橋上部の塩害による劣化進行モデルの開発, コンクリート工学論文集, Vol. 15, No. 1, pp. 13-22., 2004年1月
- 8) 横田弘, 岩波光保, 関根好幸: 海岸保全施設の老朽化実態とその進行モデルの構築, 海岸工学論文集, Vol. 50, pp. 911-915., 2003年
- 9) 岩崎福久, 田中茂信, 佐藤慎司, 名合宏之, 前野詩朗, 小谷祐司: 海岸堤防の空洞化発生機構に関する実験的研究, 海岸工学論文集, Vol. 42, pp. 1026-1030., 1995年
- 10) 原田英治, 後藤仁志, 酒井哲郎, 鄭知博: 波浪による護岸隣接砂層内の空洞成長過程の3Dシミュレーション, 海岸工学論文集, Vol. 20, pp. 891-895., 2003年
- 11) 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: 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. 441-555., 2001年
- 12) 小田晃, 栗津清蔵: 消波ブロック周辺の洗掘発生限界と洗掘深の発達について, 海岸工学論文集, Vol. 40, pp. 511-515., 1993年
- 13) 荒木進歩, 藤原由康, 出口一郎: 確率論的手法を用いた人口リーフ被覆石の安定性の検討, 海岸工学論

- 文集, Vol. 46, pp. 901-905., 1999年
- 14) 海岸保全施設技術研究会：海岸保全施設の技術上の基準・同解説, 2004年
 - 15) 安間清, 石渡友夫：海岸保全施設の維持管理手法, 港湾技術研究所資料, No. 557, 52p., 1986年6月
 - 16) 財団法人沿岸開発技術研究センター：港湾構造物の維持・補修マニュアル, 1999年
 - 17) 例えば, Alfredo H-S. Ang and Wilson H. Tang 著, 伊藤学, 亀田弘行 訳：土木・建築のための確率・統計の基礎, 丸善, 412p., 1977年6月
および, Alfredo H-S. Ang and Wilson H. Tang 著, 伊藤学, 亀田弘行, 黒田勝彦, 藤野陽三 共訳：土木・建築のための確率・統計の応用, 丸善, 584p., 1988年1月
 - 18) 社団法人日本道路協会：道路橋示方書・同解説 IV 下部構造編, p. 254, 2002年3月
 - 19) 高田悦子, 諸星一信, 平石哲也, 永井紀彦, 竹村慎治：我が国沿岸の波浪外力の分布（海象外力検討調査）, 国土交通省国土技術政策総合研究所, 国総研資料第88号, 132p., 2003年6月
 - 20) 合田良實：港湾構造物の耐波設計 波浪工学への序説, 鹿島出版会, 333p., 1997年5月
 - 21) 富田孝史, 下迫健一郎, 山田昌郎, 横田弘：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, 港湾空港技術研究所資料, No. 1060, 31p., 2003年9月
 - 22) 海岸保全施設築造基準連絡協議会, 改訂 海岸保全施設築造基準解説, 1987年
 - 23) Thoft-Christensen, P. and M. J. Baker 著, 室津義定 訳：構造信頼性理論と応用, Springer-Verlag Tokyo, 271p., 1986年

港湾空港技術研究所資料 No.1131

2006.6

編集兼発行人 独立行政法人港湾空港技術研究所

発行所 独立行政法人港湾空港技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号
TEL.046(844)5040 URL.http: www.pari.go.jp

印刷所 ニッセイエブロ株式会社

Copyright © (2006) by PARI

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of PARI.

この資料は、港湾空港技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は港湾空港技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。