

港湾施設のアセットマネジメントに向けた 評価システムの構築

DEVELOPMENT OF EVALUATION SYSTEM FOR ASSET MANAGEMENT OF PORT FACILITIES

鈴木 誠¹・稲田 裕²・石井 清¹・海野展靖³
Makoto SUZUKI, Hiroshi INADA, Kiyoshi ISHII and Nobuyasu UNNO

¹フェロー会員 工博 清水建設(株)技術研究所(〒135-8530 東京都江東区越中島三丁目4-17)

²正会員 工博 清水建設(株)技術研究所(〒135-8530 東京都江東区越中島三丁目4-17)

³正会員 工修 清水建設(株)土木技術本部(〒105-8007 東京都港区芝浦一丁目2-3)

Recently, deterioration of infrastructures has become social problem in Japan, and the application of the asset management system for the maintenance of infrastructures is attracting wide attention. In this study, comprehensive research to develop the asset management system for port facilities has been conducted in order to enable effective planning of maintenance strategy. The practical data management system is being developed, and its outline and characteristics are demonstrated in this paper. The system adopts ASP (Application service provider) system, and has good availability for the users. Furthermore, several analytical methods based on the statistical approach are proposed to assist the decision making in the management.

Key Words : *Asset management, Port facilities, Database, Reliability, Structural design, Deterioration, Markov chain model*

1. はじめに

近年, 日本では多くの社会基盤構造物の老朽化が顕在化し, それに伴う被害や事故の発生が社会的な問題となってきた。港湾施設もその例外ではなく, 岸壁等の係留施設等では老朽化が進み, 早急に適切な対策を取らないと安全性や機能性の保持に支障を来すことが予想されるものも見られるようになりつつある。さらに, 維持保全対策の求められるストックも増大しつつあるため, 今後は維持・修繕にかかる費用が著しく増大することが考えられる。限られた予算の中で適切な維持管理を行うためには, 従来の事後保全的な維持管理に変えて, 予防保全の考え方にに基づき対策を施すことが有効であると言われている。そこで国や自治体などを中心に, アセットマネジメントの考え方を構造物の維持管理に導入し, 効率的な対策を行う試みが進められてきている¹⁾。特に橋梁の維持管理では, 幾つかのマネジメントシステムが提案され, 実際に運用されている例も見られるようになってきた²⁾。港湾施設についても, アセットマネジメント

の適用性の検討が進められ³⁾, ライフサイクルコストの考え方に基づく維持管理計画の立案方法の提案がなされた例も見られる⁴⁾。しかし, 港湾施設の実用的なアセットマネジメントシステムの構築は未だ十分には進められておらず, 実構造物に適用を図った例はほとんどみられない。

アセットマネジメントの適用では, 対象構造物と目的を明確にして, 適切なシステムの構築を図っていく必要があることが指摘されている⁵⁾。前述の橋梁のアセットマネジメントシステムにおいても, データ管理に重点を置いた高度なデータベースシステムから, 検査結果の処理を効率的に行うためのもの, 中長期的な維持管理計画の立案を効果的に実施するためのもの等, 様々な観点からの検討とシステム開発が進められている。本研究では港湾施設を対象として, 維持管理, 特に効率的な補修計画の立案を支援するシステム構築を目的として, アセットマネジメントシステムの開発を進めている。本報では, 開発しているアセットマネジメントの基本的な考え方やその概要, また開発中のデータマネジメントシステムの特徴を示す。さらに, アセットマネジメントにおける意

志決定を支援する評価ツールとして、幾つかの確率統計的な手法に基づく評価手法を提案している。その例として、限界状態設定法に関する検討結果を第4章に、劣化評価に関するものを第5章に示す。

2. アセットマネジメントの考え方

(1) アセットマネジメントの概要と構築の目的

構造物のライフサイクルとアセットマネジメントの位置づけ、考え方を図-1に整理して示す。本研究ではアセットマネジメントを、構造物の供用期間中に適切な補修、補強を行いながら維持保全を図っていくための支援ツールとして位置づけている。そして、調査から評価・計画、さらには工事・監視に至る一連の流れを統合的に管理することを可能とするようなマネジメント手法の構築を目指している。

アセットマネジメントを支援するシステムとしては、i) 構造物諸元や調査・点検記録を管理するデータベース及び評価のフレーム、ii) 健全性評価・劣化評価とその結果に基づくLCC評価、iii) 個別の補修計画から全体計画までの維持管理計画の立案のための評価システムの3項目に関する検討を進めている。また、将来的にはデータベースを基にした管理ツールの中に評価システムを組み込み、一つの評価フレームの中で検討を行っていくことができるようにすることを予定している。次章では、開発中のデータベースシステムの概要と特徴を示す。

このようなシステムの構築により、安全で効率的な構造物の維持管理を支援することが可能となる。さらに、ライフサイクルコストの低減による維持管理費用の削減、資金の有効活用、さらにユーザ（市民、住民等）に対するアカウントビリティの向上を図ることが期待されている。

(2) 評価システムの構築

アセットマネジメントに基づく維持管理の実現には、

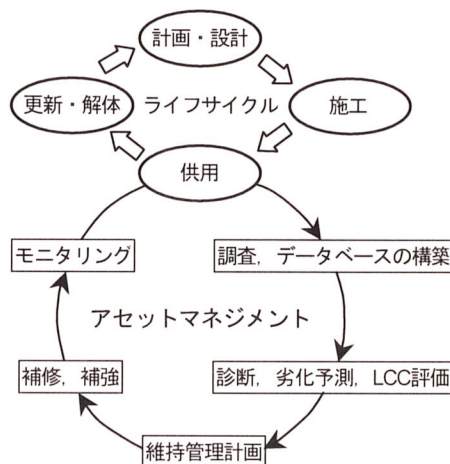


図-1 アセットマネジメントの位置づけ

上記のようなデータ管理、処理システムとともに、構造物の状態や性能を正確に把握するための評価手法の構築も重要となる。構造物の安全性や経年的な劣化に関する解析的な評価においては、図-1に示すように、計画、設計段階から更新・解体に至る構造物のライフサイクルに亘って、データの処理や評価を統合的な考え方に基づいて行うことが重要となる。港湾施設の特徴として、自然環境の影響が大きく、外力や劣化特性・材料特性等の不確定性を考慮した評価が求められていることが挙げられる。本研究では、変数の不確定性を考慮する手法として、確率統計的な考え方をを用いた解析を進めている。後の章では、その例として、信頼性に基づく矢板式の係船岸の設計法と、防潮堤の経年劣化の評価手法に関する検討事例を示す。

3. データベースの構築

(1) 基本的な考え方

本研究では、汎用的な利用が可能なシステムを開発とすることを第一の目標として、ユーザの利用性が高いシステムとすることとした。さらに、このようなシステムの開発では一般的なユーザが継続的に利用できることが求められるため、システムの維持管理に過大な手間や費用が求められないこと、データのセキュリティ等に十分な対処がなされていることなどが重要となる。このような要求性能を満たすシステムとして、図-2に示すようなASP (Application service provider) 方式をとる汎用的なシステムの拡張を図るものとした。

現在、建物・土地の資産運用を目的に開発され、既に商用システムとして業務展開が図られている@プロパティ⁶⁾（プロパティデータバンク(株)）をその拡張性と信頼性から開発のベースとして選択し、社会基盤構造物の維持管理のための機能の追加、構成の変更に関する共同開発を進めている。このシステムは、元々は資産管理に主眼をおいたものであるが、構造物の基本情報や点検・検査情報の処理機能を有し、社会資本のマネジメン

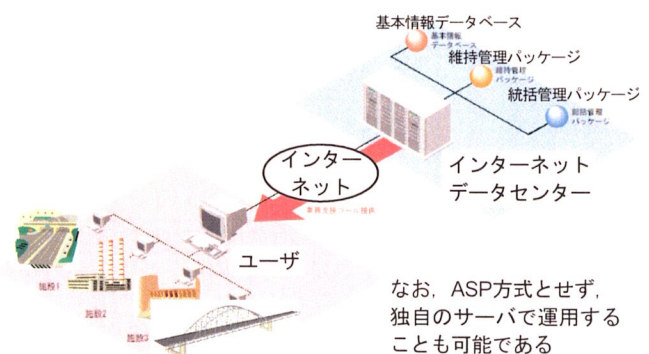


図-2 ASPを利用したマネジメントシステムの概要

施設基本情報

建物名称: ○○事業所東ア1棟 土庫

建物コード: 0001

建物名称: 設備・部品・材料 リスト

区分	種別	名称	製造元	型式	
港湾施設/係留施設	A様機	5001-R01	A様機	01ブロック	〇〇建設会社
		5002-R01	A様機	02ブロック	A様機
		5003-R01	A様機	03ブロック	〇〇建設会社
		5004-R01	A様機	04ブロック	〇〇建設会社
		5005-R01	A様機	05ブロック	A様機
		5006-R01	A様機	06ブロック	〇〇建設会社
		5007-R01	A様機	07ブロック	A様機
		5008-R01	A様機	08ブロック	A様機
		5009-R01	A様機	09ブロック	〇〇建設会社
		5010-R01	A様機	10ブロック	〇〇建設会社
港湾施設/係留施設	B様機	7001-R01	B様機	01ブロック	〇〇建設会社
		7002-R01	B様機	02ブロック	〇〇建設会社
港湾施設/係留施設	C様機	2150101-R01	C様機	01ブロック	〇〇建設会社

a) 施設基本情報

点検情報

建物名称: ○○事業所東ア1棟 土庫

建物コード: 0001

点検名称: 設備・部品・材料 リスト

区分	種別	名称	製造元	型式	
港湾施設/係留施設	A様機	5001-R01	A様機	01ブロック	〇〇建設会社
		5002-R01	A様機	02ブロック	A様機
		5003-R01	A様機	03ブロック	〇〇建設会社
		5004-R01	A様機	04ブロック	〇〇建設会社
		5005-R01	A様機	05ブロック	A様機
		5006-R01	A様機	06ブロック	〇〇建設会社
		5007-R01	A様機	07ブロック	A様機
		5008-R01	A様機	08ブロック	A様機
		5009-R01	A様機	09ブロック	〇〇建設会社
		5010-R01	A様機	10ブロック	〇〇建設会社
港湾施設/係留施設	B様機	7001-R01	B様機	01ブロック	〇〇建設会社
		7002-R01	B様機	02ブロック	〇〇建設会社
港湾施設/係留施設	C様機	2150101-R01	C様機	01ブロック	〇〇建設会社

b) 点検情報

図-3 システムの出力イメージ

トという観点で構造物の維持管理への適用性も十分有している。またデータセンターに置かれたデータに関しては、安全性やセキュリティに関して十分な管理がなされている。現在は港湾施設を対象を絞ったシステム開発を進めているが、将来的には他の土木施設や建築物への適用を進め、多くの施設の総合的な管理を可能とすることを検討している。

(2) システムの概要と特徴

システムの入出力イメージとして、施設の基本情報と点検・検査データの表示画面の例を図-3に示す。図から分かるように、入力及びデータの表示は全てウェブブラウザ上で行うため、ユーザは難しいデータベース管理のアプリケーションを意識することなしに操作が可能である。そして、インターネットに接続することさえできれば、どこからでも容易にデータの入力、参照が行える。さらに、ログインユーザの役割に応じて、操作画面やデータの処理の権限等を選択することもできる。また、写真や関連書類、図面等は電子情報として決められた場所に格納し、データと関連することができる。

4. 信頼性に基づく設計法の検討

(1) 検討の目的と内容

近年、構造物の設計基準についても性能規定化や照査方法の標準化が進められ、従来の許容応力度に基づく安全率法から信頼性の原則に基づく設計法へ変更することが要求されている。本章では、矢板式係船岸の設計を対象とし、荷重側と抵抗側の両方に作用する地盤特有の課題をもつ部分係数の適用性の検討を行った結果⁹⁾を示す。

この検討では、不確定性が大きい地盤パラメータのばらつきを考慮して、既設の矢板係船岸を対象とした信頼性評価を実施し、現行設計基準が有する信頼性水準を把握する。そして、得られた結果を基に、部分係数形式の検討および感度係数を用いた設計値に基づく方法により部分係数の設定を行う。さらに、設定された部分係数を用いて設計された断面を、従来の方法で設計された断面と比較することにより、新しく設定した部分係数法の適用性を検討する。

(2) 検討方法

対象とする矢板式係船岸は図-4のように、海底面に打込まれた矢板の上部にタイロッドを連結し、その背後に控えを設置する構造である。ここでは、矢板式係船岸の設計で考慮する限界状態として、常時と地震時で次に示す3種類の終局限界状態を扱う。

- 矢板の海底面への根入れ深さに関する安定性

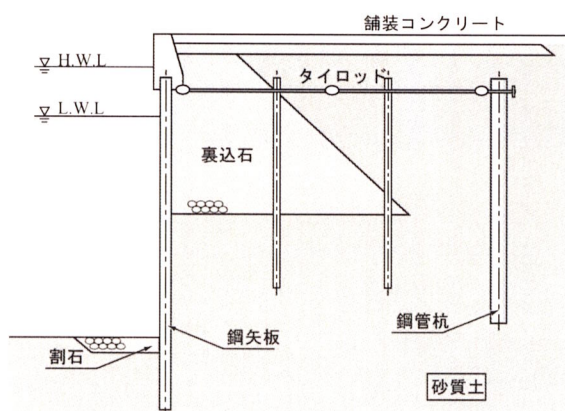


図-4 矢板式係船岸

- ・ タイロッドに生じる張力に関する安全性
- ・ 矢板に生じる最大発生曲げモーメントに関する安全性

既設の8 箇所の矢板式係船岸を対象に、破壊点まわりのテラー展開に基づく一次近似信頼性法(First order Reliability Method: FORM)を用いて、信頼性指標 β による評価を行う。ここでは、限界状態別に各地点の β の値と許容応力度設計の際の安全率との関係を検討する。

性能関数は仮想ばり法に基づいて作成した。なお、土圧の算定は、常時はクーロンの式、地震時は物部・岡部の式を用いた。また地震時の検討では、海底面10m 以深の粘性土に関しては震度を0 として土圧の算定を行う。

(3) 既設構造物の信頼性評価

基本変数である土のせん断強度（内部摩擦角 ($\tan\phi$), 粘着力(c)), 単位体積重量(γ), 主働側と受働側の壁面摩擦角 (δ_a, δ_p) の5つの変動特性は全て正規分布と仮定し、すべて各地点でのそれぞれの土層で同一の値を用いる。ここで、実地盤での一般的な変動を念頭に置き、 $\tan\phi$ と c の変動係数を10%, γ の変動係数を5%とする。さらに、 δ_a には主働側 15° , δ_p には受働側 -15° を平均値として与え、10%の変動係数とする。

得られた結果の例として、矢板の根入れ深さ、タイロッド、矢板断面に関する信頼性指標 β と安全率 F_s の関

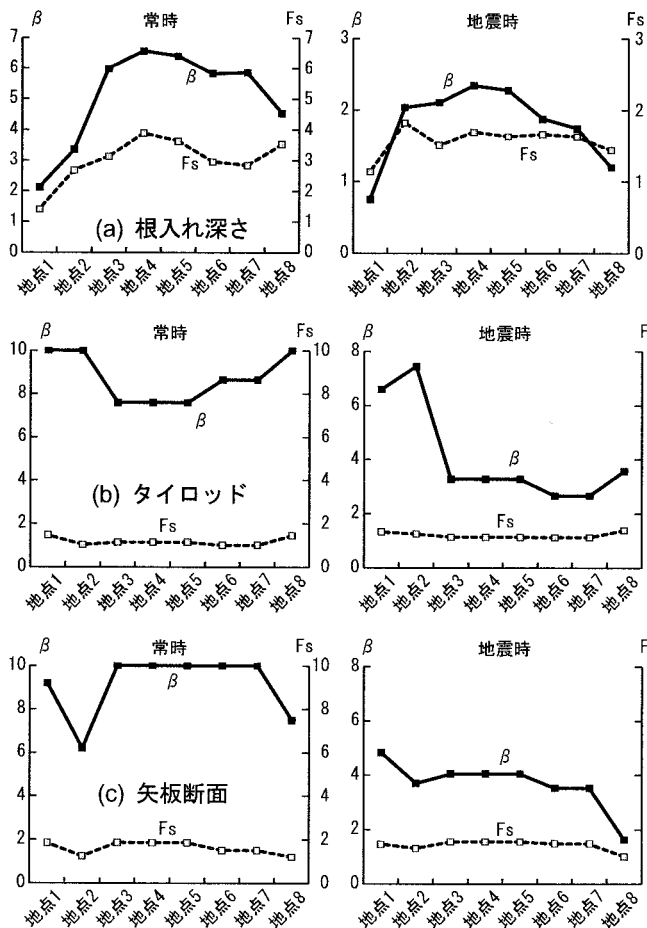


図-5 各変数に対する信頼性指標と安全率

係を図-5に示す。根入れ深さに関する信頼性指標 β は概ね常時で5.0~6.0、地震時で1.5~2.0 となった。しかし、地点1,2 では常時に低い値を示している。また、安全率を見てみると、信頼性指標の大小と比較的關係しているが、必ずしも比例した結果ではないことがわかった。一方タイロッドに関する結果では、根入れ深さの結果とは逆に地点1,2において信頼性指標が大きい結果となった。また矢板断面に関しては、地震時の信頼性と安全率は地点8を除き比較的一致している。

このように、信頼性評価により構造物の安全性余裕を定量的に評価できることが分かる。

(4) 部分係数を用いた設計法の検討

一般的な部分係数法による設計照査式は、荷重や材料特性に部分係数を用いる形式である。

$$R(f_k/\gamma_m) - S(\gamma_f \cdot F_k) \geq 0 \quad (1)$$

ここで、 R は抵抗関数、 S は荷重効果関数を表し、 f_k : 材料特性の特性値、 γ_m : 材料係数、 F_k : 荷重の特性値、 γ_f : 荷重係数である。しかし、ここでは材料特性のみ基本変数としていることから、設計値を f_d とすると、それぞれの部分係数は次式で算定できる。

$$\gamma_m = f_k/f_d \quad (2)$$

部分係数 γ_m の算定は設計値を用いる方法を用い、目標信頼性指標 β を基に設計値から各変数の確率分布を考慮して算定する。具体的には、材料特性が変動係数 V の正規分布に従うと仮定すると、感度係数を α とすると部分係数 γ_m は次式のように与えられる。

$$\gamma_m = 1/(1 - \alpha\beta V) \quad (3)$$

目標信頼性指標 β_t は、常時と地震時に各3種類の目標値を設定し、常時の目標信頼性指標は $\beta_t = 2.0, 3.0, 4.0$ 、地震時は $\beta_t = 1.5, 2.0, 2.5$ とした。また、感度係数については、せん断強度について $\alpha_{\tan\phi} = 0.9$ と $\alpha_c = 0.7$ を大きく設定し、主働側と受働側の単位体積重量は $\alpha_{\gamma a} = 0.6$ 、 $\alpha_{\gamma p} = 0.1$ 、壁面摩擦角は $\alpha_{\delta a} = 0.0$ 、 $\alpha_{\delta p} = 0.1$ と設定した。

上記のような設定の下で、既設構造物の試設計を行い、得られた断面の信頼性指標 β_{new} を算定した。ここでは、常時の目標信頼性指標を $\beta_t = 3.0$ 、地震時の値を $\beta_t = 2.0$ とした場合の結果を図-6に示す。図から分かるように、得

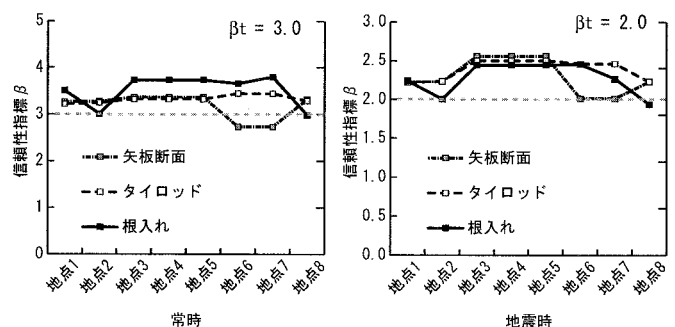


図-6 試設計による信頼性指標

られた信頼性指標 β_{new} は、常時、地震時ともに全ての地点において、多少ばらつきはあるが目標信頼性指標 β に近い値となっている。この結果から、部分係数法によればほぼ目標とした信頼性をもつ断面が設定されていることが分かる。

5. 劣化評価手法の検討

(1) 検討の目的と内容

次に、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として、三面張防潮堤を対象として、確率統計的な手法に基づき劣化・変状の遷移の評価手法の検討を行った結果⁷⁾を示す。

ここでは、防潮堤の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する。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。さらに、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) 解析手法の概要

本検討では、空洞化の進展と損傷の発生を図-7に示すような2次元モデルを用いて評価する。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仮定して、空洞化が生じた部分の地盤ばねを取り外すことによりその影響を表す。

対象構造物の劣化・変状はマルコフ連鎖モデルを用い、次の状態への状態変化のみを考慮したUnit Step B-modelに、各状態において破壊に至る変状を組み込んだ。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

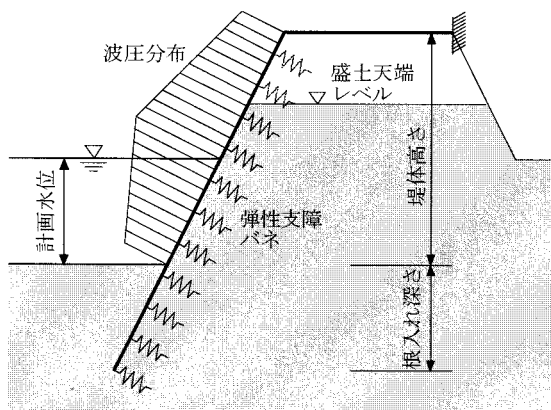


図-7 三面張防潮堤の劣化評価モデル

して与えると、次式の関係が得られる。

$$p_i = r(1 - S_i)/(1 + r), \quad q_i = (1 - S_i)/(1 + r) \quad (4)$$

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

$$\mathbf{A}(n) = \mathbf{A}(0) \cdot \mathbf{P}^n \quad (5)$$

ここで、 $\mathbf{A}(0)$ は初期時間における状態ベクトル、 $\mathbf{P}$ は式(3)から求められる遷移確率行列である。

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。

$$P_f(n) = a_{b+1}(n) \quad (6)$$

波によって堤体に損傷が発生する確率は、極値統計解析によって年最大の波高の確率分布を求め、信頼性評価に基づき算定する。損傷の生起確率は、貫通ひび割れの発生を損傷の発生として、前章と同じ一次近似信頼性法を用いて評価する。この場合は、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した。

(3) 主な評価結果

防潮堤の想定位置として、波浪データが与えられている三浦半島周辺の三地点A, B, Cを選択し、年最大波高

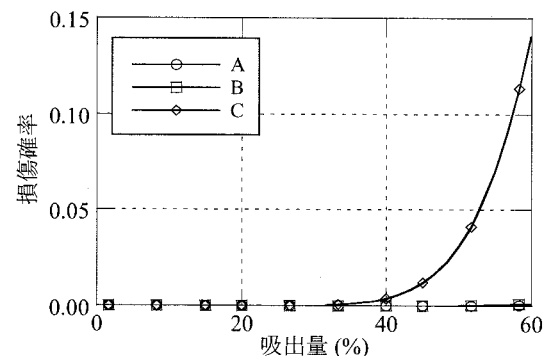


図-8 盛土の吸出量に対する損傷確率の変化

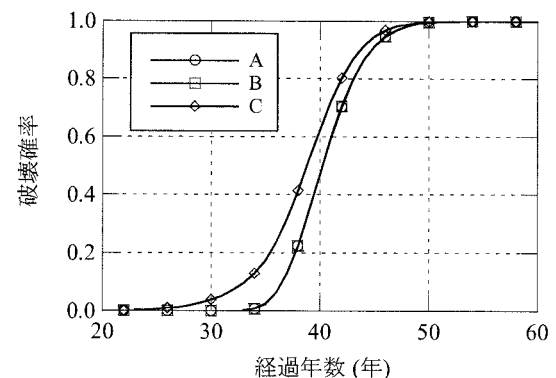


図-9 経過年数に対する破壊確率の変化

の確率分布関数を推定し、ワイブル分布により与えた。さらに堤体前面の波圧分布は、合田による不規則波の波圧算定式により求めた。なお得られた結果では、C地点における波圧分布が他の二点に比べて大きくなった。

評価対象構造物は一般的な堤体の仕様を想定し、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、堤体コンクリートは設計基準強度 20N/mm^2 、部材厚500mm、弾性係数 25kN/mm^2 、堤体盛土のN値は5として、地盤弾性係数 E_0 は $14,000\text{kN/m}^2$ ($=2,800\text{N}$) 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つ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。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。

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、損傷確率の吸出量に対する変化を図-8に示す。損傷の発生には波浪条件の影響が大きく、波高の小さいA、Bの2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。

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。盛土の天端レベルが静水面に達した時点を開洞化の進展による破壊状態として、破壊状態に達するまでの時間を開洞化による劣化の寿命 T (年) とする。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。

開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-9に示す。波浪条件が比較的穏やかなA、Bの2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、開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、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。

6. おわりに

本研究では、社会基盤構造物の維持管理の効率的な実施を支援するためのアセットマネジメントに関する検討として、データベースの構築と解析手法の検討を行った。開発を進めているデータベースは、ASP方式を採用したユーザの利用の容易さを重視したものであり、広範な利用を期待されている。今後はシステムの構築を進めるとともに、実際の運用を通じて仕様の見直しと機能の追加を進めていく。また、設計や維持管理を通しての統一的な評価を可能とする手段として、確率統計的手法を用いた信頼性に基づく評価手法を提案し、その有効性を示した。これらの手法は、現在は個々の目的で利用している段階ではあるが、将来的には統合的なシステムにまとめ、さらにアセットマネジメントシステムへの組み込みを図り、効果的な支援ツールとしていくことを予定している。

参考文献

- 1) 土木学会編：アセットマネジメント導入への挑戦，技報堂出版，194p., 2005.
- 2) 土木学会関東支部編：地方自治体のアセットマネジメント，土木学会関東支部講習会テキスト，土木学会関東支部，56p., 2007.
- 3) 高橋宏直，横田弘，岩波光保：港湾施設のアセットマネジメントに関する研究，国総研報告，No.29, 84 p., 2006.
- 4) 難波喬司，横田弘，橘義規，田中樹由，岩田好一朗：海岸保全施設におけるLCM（ライフサイクルマネジメント）の導入検討，海岸工学論文集，Vol.50, p.916-920, 2003.
- 5) 竹末直樹：港湾施設のアセットマネジメント，港湾，No.1, pp. 42-45, 2006.
- 6) プロパティデータバンク：@property（アットプロパティ），アットプロパティパンフレット
- 7) 鈴木誠，辻岡信也，菊池喜昭，山本修司，石井 清：矢板式係船岸を対象として部分係数を導入した設計法の検討，土木学会論文集，No.702/III-58, pp.401-408, 2002.3.
- 8) 稲田裕，横田弘，関根好幸，辻岡信也：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，海岸工学論文集，Vol.52, pp. 816-820, 2005.