

RC 床版の劣化予測を考慮した橋梁維持管理システムの構築

Bridge maintenance management system in consideration of degradation prediction of the RC deck slab

内山典之*, 西山 真**, 平野廣和***, 佐藤尚次****

Masayuki Uchiyama, Makoto Nishiyama, Hirokazu Hirano and Naotsugu Sato

*正会員 修士(工学) 三井住友建設㈱ (〒160-8577 東京都新宿区荒木町 13-4)

**学会員 中央大学大学院総合政策研究科 (〒192-0393 東京都八王子市東中野 742-1)

***正会員 工博 中央大学教授 総合政策学部 (〒192-0393 東京都八王子市東中野 742-1)

****正会員 工博 中央大学教授 理工学部土木工学科 (〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)

The purpose of this paper is to develop a "bridge maintenance management system" which consists two functions, a database and deterioration prediction. These functions serve as a tool for decision-makings that are connected with a maintenance management planning. By building the database, it has become possible to refer and input the present condition and history of the bridge faster. Furthermore, this bridge maintenance management system can predict the degradation of the deck slab, concerning environmental conditions, by using the presumption of the Markov model, which is basically used for degradation prediction.

Key Words: *maintenance, database, degradation prediction, Markov model*

1. はじめに

我が国における社会資本の整備は、昭和 40 年～50 年代のいわゆる高度成長期に非常に多くの資本投資が行われ、交通社会基盤施設が形成されたと言われている。社会資本は整備してから年数を経ると老朽化、陳腐化していくものである。我が国はまもなく高齢化社会を迎えようとしており、近い将来、維持補修および更新の費用は、全投資額の半分以上を超えると予測されている。

ところで、更新需要を試算した例によれば、2000 年を過ぎると高度成長期に蓄積されたストックが、更新時期を迎えることにより著しく増大し、社会資本の更新が大きな課題となってくるものと推測されている。このため、維持管理のためだけに強力な財政措置を必要とすることにもなりかねない。現在は、社会インフラの大量・大規模開発の時代が終焉を迎え、これまでの資産を有効に活用していくことが求められる時代へと変貌しつつある。

社会資本の中でも、道路資産として重要な位置を占める橋梁の維持管理対策が、重要な問題となっており、現在、我が国では数多くの橋梁が存在している。これらの橋梁は、近年における交通量

の増加、車両の大型化などにより、設計当初に予想されていた条件よりも過酷な使用条件のもとで長期間に渡り使用されてきたため、著しい損傷を受けているものもある。橋梁からコンクリート片や橋梁付属物の落下する事故が頻発し、大きな社会問題となったことは記憶に新しい。これら老朽化した橋梁を適切かつ効率的に維持管理することにより、道路機能の維持、構造物としての耐久性・耐荷性の確保、第三者被害の未然防止を行い、橋梁の長寿命化をはかることが大きな課題の一つである。

一方、既存構造物を適切に維持管理するためのマネジメントシステムの研究開発も行われている。例えば、各種構造物の維持管理業務全般を支援することを目的とし、調査・点検、健全性の診断、補修・補強工法選定等のシステム化がなされている^{1), 2)}。また、橋梁の最適維持管理計画として、数多く存在する補修・補強工法をどのように組合せて実施することで、ライフサイクルコストを最小化できるかなども研究されている^{3), 4)}。しかし、最も基本である健全性の診断については、何ををもって健全とし、またどのように定量化するか、補修・補強工法選定についてはどこまで信頼性のあ

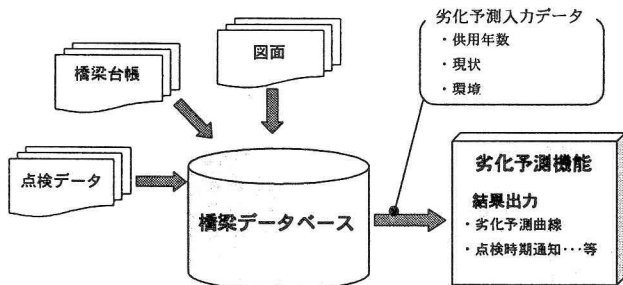


図-1 システム概要

る案を提示できるか等、個々の橋梁に対応した劣化予測などの課題が残されているのが現状である。

そこで本論では、埋もれている橋梁データの整備を行うとともに、将来にわたって橋梁を維持管理するシステムの構築を行う手法を提案する。具体的には、橋梁に関する図面、橋梁台帳、点検データを整理して収録項目を関連付けることにより、維持管理に必要なデータ項目を洗い出し、その内容とデータ項目間の関連を把握するための整合性の取れたデータベース機能を作成する。次にこれらの橋梁データより、マルコフモデルを推定し、床版を代表例として劣化予測を行うものである。これにより、維持管理計画の立案に関わる意思決定の際の参考資料となる劣化予測機能を持ち合わせ、将来を見越した最適な橋梁維持管理計画の立案を支援可能な橋梁維持管理システムの構築を目指すものである。

2. 橋梁維持管理システム概要

本論の橋梁維持管理システムは、主に橋梁に関するデータを管理するデータベース機能^{5),6)}と、劣化予測機能の二つから構成されている。図面、橋梁台帳、点検データ等のデータをデータベース化して収録し、このデータを分析して個々の橋梁に対応した床版の劣化予測を行う。図-1 に本システムの概要を示す。橋梁データベースと劣化予測機能を組み合わせ、システムを構築するには、データベースに収録されているデータを目的に合わせて加工することが重要である。さらに劣化予測に用いるために、データの集計・抽出を行う。ここに劣化予測のための入力データとして、供用年数、現在の状況、周辺の環境等を入力する。これにより、橋梁の現状把握と実データに基づく劣化予測を容易に行うことが可能となり、劣化予測曲線、点検時期通知

表-1 データベース収録項目

	項目	備考
橋梁基本データ	橋梁名	橋梁名を入力することでフリガナも自動入力される
	供用開始年	
	交通量	普通車[台/12h] 大型車[台/24h]
	所在地	
	路線名	
	橋長	
	構造	上部工形式 下部工形式 基礎形式
	有効幅員	車道、歩道の有効幅員を入力することで自動的にその合計を算出
	路面位置	上路・中路・下路から選択
	適用示方書	
点検データ	写真	
	地図	橋梁の所在地を示す地図の表示
	点検年	点検を行った年の入力
	点検番号	
損傷部材データ	支間長	
	各部材の損傷ランク	
	部材有無	対象橋梁に部材があるかを示す
	部材名	
	部材番号	図面に対応した部材番号
	損傷ランク	
	損傷種類	
	写真	
図面	3DCGデータ	CADの図面を収録 部材の損傷位置を示す3次元CGモデル

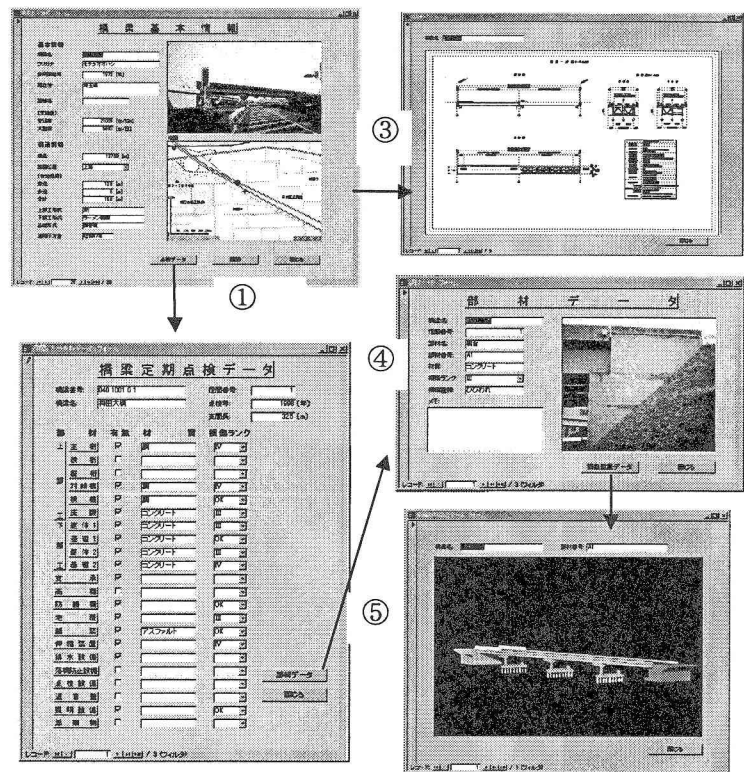


図-2 データベース画面

等を行うことを目的としている。

3. データベース構築

橋梁の維持管理は、橋梁台帳と橋梁点検⁷⁾（通常点検・定期点検）により橋の健全度を確認している。しかし、これは橋梁点検という単一的自己完結型の維持管理機能であり、従来からそこで得

表-2 損傷ランク定義

ランク	内容
OK	損傷は認められない
IV	損傷あり、程度を記録する必要がある
III	損傷あり、追跡調査を行う必要がある
II	損傷が大きく、詳細調査を実施し補修の検討が必要
I	損傷が著しく、交通の安全確保の支障となる恐れあり

た貴重なデータの集積や活用がされていないことが多い。その原因の一つは、データが紙ベースであることである。最近では、様々なデータがデジタル化され、橋梁に関するデータベースも構築されてきているが、膨大なデータを入力しただけのものも多く、維持管理業務に有効活用されているとはいいがたい。そこで、橋梁維持管理システムの機能の一つであるデータベースは、橋梁台帳と橋梁点検業務で得られたデータをデジタルデータ化して収録し、データを整理・分析することにより単なるデータ保管ではなく、補修・補強計画の立案をするためのデータベースを構築することが必要である。

表-1 にデータベース収録項目を、図-2 にデータベース画面をそれぞれ示す。まず、橋梁台帳から基本的なデータを入力するために橋梁基本情報となる①の画面を開く。この画面より、参照したい橋梁を選択し、②の橋梁点検データや③の図面の画面へと進む。橋梁定期点検データでは部材ごとに損傷ランクが示されており、ここに表-2 に示す損傷ランクで入力されたデータを集計し劣化予測に用いる。さらに細かく部材個々のデータを参照したい場合には④の部材データの画面へと進む。これは、部材ごとの詳細な点検データを表示する画面である。さらに、損傷位置データのボタンをクリックすると、部材データ画面で表示されている部材の位置を示す⑤の3DCG モデルが表示される。なお、3DCG モデルは、Auto-CAD で作成された CAD の図面を元にして、市販の安価な 3DCG 作成ソフトである Shade を利用することで簡単、短時間に作成可能⁸⁾となっている。これらのデータを維持管理に必要なデータ項目の意味内容とデータ同士を関連付け、単に橋梁のデータを収めているだけでなく、一連の流れとして橋梁の現状を素早く把握することを可能にしている。また、3DCG モデルも収録していることから、複雑な橋梁の損傷箇所も一目で確認することが可能なシステムとなっている。

4. 床版劣化予測

橋梁維持管理システムの維持管理計画支援ツ

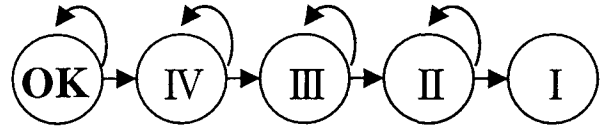


図-3 劣化状態推移図

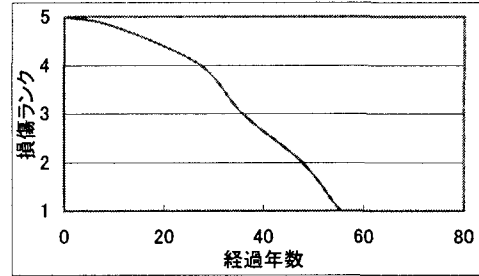


図-4 平均劣化曲線

ールとして、劣化予測機能を検討する。本研究では、表-2 に示す定期点検結果の「OK, IV, III, II, I」と5段階で評価されている損傷ランクを部材の劣化状態とする。この劣化状態が推移する様をマルコフモデル⁹⁾で予測する。ここで、データベースに収録されている全ての橋梁データの耐用年数、損傷ランキングを集計し、その結果を随時反映させることとする。

劣化がある確率に従い現状を維持して次の状態へと推移するとし、実際の都市部における約 70 橋の床版定期点検データより、5 年ごとにランクが推移する確率を推定する。推移確率を推定する場合、個々の履歴データを用いるのが望ましいが、個々の橋梁に対し供用開始年度より 5 年ごとに点検を行っている例は少ない。仮に存在したとして推移確率を推定した場合、求まるのはその橋梁の推移確率であり、他の橋梁への適用が困難である。そこで、本研究では各時点での橋梁定期点検データの損傷ランク分布のマクロデータより推移確率を推定し、これを平均的な劣化の状態推移とする。

$y_{t,i}$ を時点 t ($0 \leq t \leq T$) における損傷状態 i のデータとし、それらを要素とする確率ベクトルを y_t であらわす。ここで、 y_t が推移確率行列 $P = (p_{ij})$ を持ったマルコフ連鎖の時点 t における分布を正しくあらわしているとすれば、

$$y_t = y_{t-1} P$$

となっている。そこで、 $1 \leq t \leq T$ のすべての t について、 $y_t - y_{t-1} P$ の各要素の、2 乗の和を最小にする P を選べば、真の推移確率行列の推定値が得られることが期待される。

$$\sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^S \left(y_{t,j} - \sum_{i=1}^S y_{t-1,i} p_{ij} \right)^2 \quad (1)$$

表-3 交通量区分

普通車[台/12h]	大型車[台/24h]
10000台未満	1000台未満
10000～20000台未満	1000～5000台未満
20000～30000台未満	5000～10000台未満
30000～40000台未満	10000台以上
40000台以上	

表-4 交通量劣化要因変数

大型車	$\gamma(OK)$	$\gamma(IV)$	$\gamma(III)$	$\gamma(II)$	$\gamma(I)$
1千[台/24h]未満	0.130	0.101	0.101	0.136	0.250
1～5千[台/24h]未満	0.087	0.067	0.067	0.091	0.218
5～1万[台/24h]未満	0.055	0.042	0.042	0.057	0.109
1万[台/24h]以上	0.162	0.126	0.126	0.170	0.359

普通車	$\gamma(OK)$	$\gamma(IV)$	$\gamma(III)$	$\gamma(II)$	$\gamma(I)$
1万[台/12h]未満	0.187	0.184	0.033	0.041	0.200
1～2万[台/12h]未満	0.104	0.104	0.019	0.023	0.200
2～3万[台/12h]未満	0.005	0.000	0.000	0.000	0.039
3～4万[台/12h]未満	0.086	0.078	0.014	0.017	0.102
4万[台/12h]以上	0.200	0.210	0.037	0.046	0.337

ここで、式(1)を最小にするように p_{ij} を決める。
さらに、式(1)を p_{ij} について偏微分しこれを0と置けば、

$$\begin{aligned} \sum_{t=1}^T y_{t-1,i} y_{tj} &= \sum_{t=1}^T y_{t-1,i} \sum_{k=1}^S y_{t-1,k} p_{kj} \\ &= \sum_{k=1}^S \left(\sum_{t=1}^T y_{t-1,i} y_{t-1,k} \right) p_{kj} \end{aligned} \quad (2)$$

となり、

$$Y = \sum_i y_{t-1,i} y_{tj}, \quad Z = \sum_i y_{t-1,i} y_{t-1,j}$$

とすると、 $Y=ZP$ と書ける。すなわち

$$\hat{P} = Z^{-1}Y \quad (3)$$

によって推移確率を推定することができる。

しかし推移確率行列は、離散時点での損傷ランク分布より推定していることから、このままでは劣化状態が回復する確率も含まれるので、劣化現象を正確に捉えていない。そこでラグランジュの未定乗数法を用い、図-3に示す状態推移図のように「劣化は状態 i にとどまるか次の状態 j へのみ推移する。」という仮定を導入する。ここで状態番号の組 (k, h) のある集合 J が与えられたとき、式(4)の条件の下で式(1)を最小にする $P=(p_{ij})$ を求めることになる。

$$\begin{aligned} p_{kh} &= 0, \quad (k, h) \in J \\ \sum_{j=1}^S p_{ij} &= 1, \quad i = 1, 2, \dots, s \end{aligned} \quad (4)$$

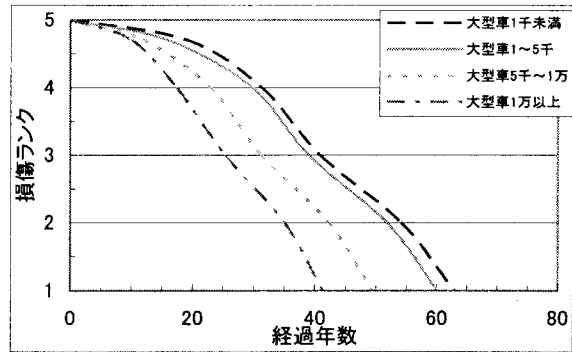


図-5 大型車交通量区分別劣化曲線

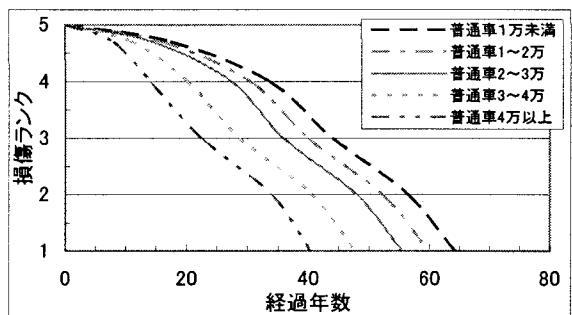


図-6 普通車交通量区分別劣化曲線

よって、実際の橋梁定期点検データより推定したマルコフモデルは以下ようになる。

$$P = \begin{matrix} & \begin{matrix} OK & IV & III & II & I \end{matrix} \\ \begin{matrix} OK \\ IV \\ III \\ II \\ I \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0.8165 & 0.1783 & 0.0 & 0.0064 & 0.0 \\ 0.0 & 0.4322 & 0.5397 & 0.0297 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 0.6159 & 0.3872 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.3247 & 0.6782 \\ 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 1.0 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

これより、各ランクに到達する平均時間を求め、算出した平均劣化曲線を図-4に示す。OKからIVまでは比較的ゆっくりと劣化が進み、その後急激に劣化が進むという結果を得た。

5. 劣化要因変数導入

橋梁のコンクリート部材の劣化に影響を及ぼす因子としては、疲労、塩害、凍害、アルカリ骨材反応、中性化、化学的侵食など様々な要因^{10), 11)}が考えられる。これらの劣化要因は、時間的な経過や地域によって大きく異なる。そこで、個々の橋梁に対応した劣化予測を行うためには、環境の違いによる劣化の影響を考慮しなければならない。本論では、代表的な劣化要因として交通量の影響と塩害による影響をそれぞれ検討する。

表-5 表面塩化物イオン濃度 C_0 [kg/m³]

飛沫帯	海岸からの距離(km)				
	汀線付近	0.1	0.3	0.5	1.0
13.0	9.0	4.5	3.0	2.0	1.5

表-6 離岸距離別鉄筋腐食開始年数

	飛沫帯	汀線付近	0.1[km]	0.25[km]	0.5[km]	1.0[km]
腐食開始年	7	9	17	28	73	100以上

表-7 塩害の劣化要因変数

	海岸からの距離					
	飛沫帯	汀線付近	0.1[km]	0.25[km]	0.5[km]	1.0[km]
1.0→0.75	0.36875	0.301704	0.17467	0.11062	0.04425	0
0.75→0.50	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0
0.50→0.25	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0
0.25→0.0	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0

5.1 交通量の影響

都市部の橋梁において床版劣化の最も大きな要因としては、交通荷重による疲労損傷が考えられる。今回用いたデータは主に東京都内の橋梁なので、特に交通量による影響が大きいと思われる。そこで、用いたデータを普通車・大型車別で交通量区分ごとに整理し、実データより交通量別の影響を算出し、マルコフモデルに導入する。ここでの大型車・普通車交通量区分を表-3に示す。

この区分ごとに、ある時点での損傷ランク分布より交通量による劣化の影響を大型車、普通車別に算出する。変数マルコフモデルの特徴として、線形で表現される現象しか取り込めない。そこで、交通量区分による各損傷ランクの分布を線形近似し、交通量区分による劣化の影響をあらわす確率を算出し、これを劣化要因変数： γ とする。マルコフモデルに導入する交通量の影響による γ は、用いた点検データの分布を線形近似して求める。これを表-4に示す。全データの大型車、普通車の平均値より交通量の少ない区分では、 γ を劣化が滞在するように、交通量の多い区分では劣化が進行するように導入し、変数マルコフモデルを構築する。前者を滞在型マルコフモデル修正法、後者を進行型マルコフモデル修正法と呼ぶこととし、以下に示す。

<滞在型変数マルコフモデル修正法>

$$P = \begin{bmatrix} \gamma_{OK} + (1 - \gamma_{OK})P_{11} & (1 - \gamma_{OK})P_{12} & (1 - \gamma_{OK})P_{13} & (1 - \gamma_{OK})P_{14} & (1 - \gamma_{OK})P_{15} \\ 0 & \gamma_N + (1 - \gamma_N)P_{22} & (1 - \gamma_N)P_{23} & (1 - \gamma_N)P_{24} & (1 - \gamma_N)P_{25} \\ 0 & 0 & \gamma_{III} + (1 - \gamma_{III})P_{33} & (1 - \gamma_{III})P_{34} & (1 - \gamma_{III})P_{35} \\ 0 & 0 & 0 & \gamma_{II} + (1 - \gamma_{II})P_{44} & (1 - \gamma_{II})P_{45} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

<進行型変数マルコフモデル修正法>

$$P = \begin{bmatrix} (1 - \gamma_N)P_{11} & \gamma_N + (1 - \gamma_N)P_{12} & (1 - \gamma_N)P_{13} & (1 - \gamma_N)P_{14} & (1 - \gamma_N)P_{15} \\ 0 & (1 - \gamma_{III})P_{22} & \gamma_{III} + (1 - \gamma_{III})P_{23} & (1 - \gamma_{III})P_{24} & (1 - \gamma_{III})P_{25} \\ 0 & 0 & (1 - \gamma_{II})P_{33} & \gamma_{II} + (1 - \gamma_{II})P_{34} & (1 - \gamma_{II})P_{35} \\ 0 & 0 & 0 & (1 - \gamma_I)P_{44} & \gamma_I + (1 - \gamma_I)P_{45} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

ここで、大型車交通量区分ごとに構築した変数マルコフモデルによる劣化曲線を図-5に、普通車交通量区分ごとの劣化曲線を図-6に示す。大型車・普通車交通量区分それぞれ、実データより求めたマルコフモデルに劣化要因変数を導入することで、交通量の多い区分では劣化進行が早まり、逆に少ない区分では劣化進行が遅くなるという、劣化の進行速度の異なる劣化曲線を得ることができた。

5.2 塩害の影響

本論では、地域ごとに異なる飛来塩分量による影響から、塩害劣化の潜伏期となる塩化物イオンがコンクリート中へ浸透して鉄筋の不動態皮膜を破壊し、鉄筋の腐食が始まるまでの時間を推定する。また、鉄筋の腐食が始まる進展期、加速期、劣化期での腐食速度を求め100年後までの鉄筋の腐食量を推定する。

(1) 塩化物の浸入

表-5に示す、コンクリート標準示方書[施工編](案)¹²⁾に示されている離岸距離ごとのコンクリート表面の塩化物イオン濃度で、劣化の潜伏期となる塩化物イオンが不動態皮膜を破壊して鋼材に到達するまでの時間を求める。

コンクリート表面に付着した塩化物イオンが浸透し、鉄筋の不動態皮膜を破壊するまでの時間を推定するに際し、塩化物イオンは外部から浸透してくる塩化物イオンのみとし、骨材に含まれるような内在イオンについては考慮しないこととする。塩化物イオンの浸透がFickの拡散法則に従うとすれば、Fickの拡散方程式は式(5)となる。

$$C_c(x, t) = C_c \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_c \cdot t}} \right) \right\} \quad (5)$$

$C_c(x, t)$: コンクリート表面から x [m] の位置での塩化物イオン濃度 kg/m³

x : コンクリート表面からの深さ (=5.0cm)

t : 塩化物イオンの侵入に対する耐用年数[年]

C_c : 表面塩化物イオン濃度 kg/m³

D_c : 塩化物イオンの拡散係数 ($=6.31 \times 10^{-5} \text{m}^2/\text{年}$)
 erf : 誤差関数 $\text{erf}(s) = \int_0^s e^{-s^2} ds$

式(5)より離岸距離別に鉄筋の不動態皮膜が破壊される。鋼材腐食発生限界濃度 $C_{Lim}=1.2\text{kg/m}^3$ に達するまでの時間を求めたものを表-6 に示す。この結果より、離岸距離が 1.0km では塩化物イオンが 100 年以内では鉄筋の不動態皮膜を破壊しないという結果を得た。

(2) 鉄筋腐食速度推定

腐食速度を推定するに際し、酸素の浸透は Fick の拡散法則に従うものとし、拡散係数および表面濃度は時間によらず一定とする。 $t=0$ のとき、コンクリート中の酸素濃度は 0 であるとする。また、鉄筋表面に流入してくる溶存酸素量がすべて腐食反応に使用されると仮定すると、(酸素の流入量) = (腐食による酸素の消費量) となり、これより鉄筋の腐食速度 F_r は、式(6)で示される。

$$F_r = \frac{K_{ri}^A}{K_{oi}^C} \cdot \frac{C}{A} \cdot \left(-\kappa \times D_o \frac{dC_o(x,t)}{dx} \right) \quad (6)$$

C_o : 酸素の表面濃度 ($=0.26\text{kg/m}^2$)

$C_o(x,t)$: 鉄筋位置での浸透開始から時間 t における酸素濃度

D_o : 気体状態の酸素の拡散係数 ($=0.7884\text{m}^2/\text{年}$)

κ : 水中における酸素の割合を示す係数 ($=0.03 \times S/100$) ここで S は飽和度であり 60 とする。

K_{ri}^A : 電流密度を錆生成速度に変換する電気化学当量 ($=5.55 \times 10^{-4} \text{g/c}$)

K_{oi}^C : 電流密度を酸素消費速度に変換する電気化学当量 ($=8.29 \times 10^{-5} \text{g/c}$)

C/A : カソードとアノードの面積比

式(6)の腐食速度を時間積分することで、鉄筋腐食量を得られる。100 年後の腐食量を最大腐食量とし、鉄筋腐食残存率を求める。鋼材の腐食発生までの時間も考慮した離岸距離別の経過年数と鉄筋腐食残存率の関係を図-7 に示す。

この鉄筋腐食残存率の減少が劣化の進行と考えられるので、それぞれの離岸距離で腐食開始までの時間も考慮し、鉄筋腐食残存率が 1.0 から 0.75, 0.75 から 0.5, 0.5 から 0.25, 0.25 から 0.0 へ減少する速度を相対的に算出し、劣化要因変数とした結果を表-7 に示す。ここで、離岸距離 1.0km では 100 年間で塩害による鉄筋の腐食はなしとなり、塩害による劣化要因変数は 0 である。次に塩害による劣化要因変数を導入し変数マルコフモデルを構築する。この際、マルコフモデル推定に用いた

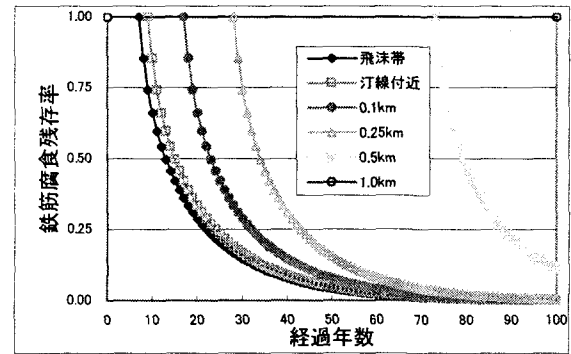


図-7 離岸距離別鉄筋腐食残存率

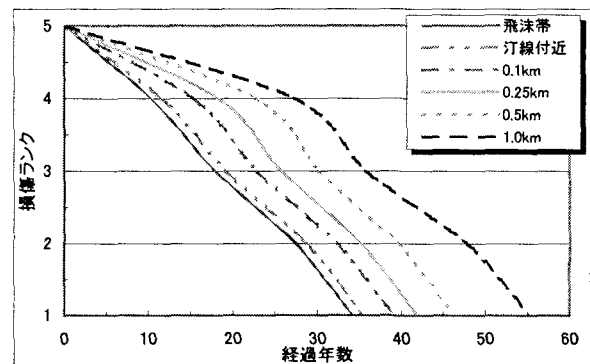


図-8 離岸距離別劣化曲線

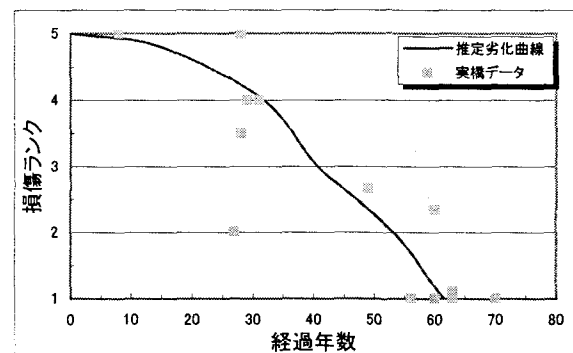


図-9 推定劣化曲線と実データ比較①

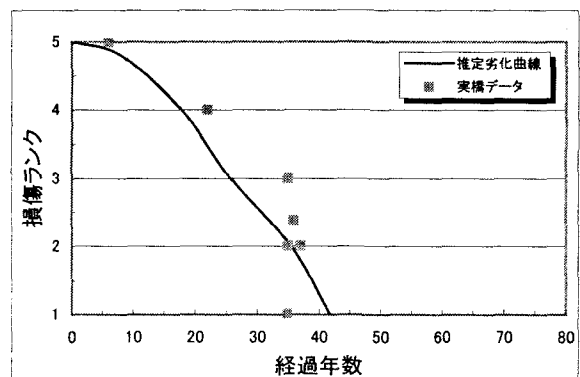


図-10 推定劣化曲線と実データ比較②

橋梁データは全て離岸距離が 1.0km 以上なので、劣化要因変数を導入する場合は、進行型変数マルコフモデルとなる。

図-8 に塩害の影響による離岸距離別の劣化曲線を示す。不動態皮膜の破壊までの時間と鉄筋の腐食速度から、離岸距離ごとに塩害劣化の進行速度の違いを求め、劣化要因変数としてマルコフモデルに導入することで、塩害の影響による劣化進行の違いをあらわすことが出来た。

6. 複合劣化の検討

これまで、普通車・大型車交通量、塩害の影響を算出し、劣化要因変数として実データから推定したマルコフモデルに導入してきた。各種劣化要因ごとに算出した劣化要因変数を合成し、複合劣化について検討する。

普通車・大型車の影響の合成は、それぞれの重量を荷重と考え重み付けをする。車両重量・乗車定員・最大積載量を加えたものを車両総重量とし、普通車、大型車別に平均値を求める。車両総重量の比は、

$$\text{普通車：大型車} = 0.11 : 0.89$$

で表す。これを劣化に影響する重みとし、交通量の劣化要因変数は式 (7) のようになる。

$$\gamma_{k,j} = 0.11 \gamma_{n,j} + 0.89 \gamma_{b,j} \quad (7)$$

$\gamma_{k,j}$: 交通量による劣化要因変数

$\gamma_{n,j}$: 普通車交通量による劣化要因変数

$\gamma_{b,j}$: 大型車交通量による劣化要因変数

次に、塩害の影響を合成する。本論でのマルコフモデルを推定するのに用いた橋梁定期点検データは、都市部のもので離岸距離も全て 1.0km 以上であるので塩害による劣化要因変数は 0 となる。そこで塩害の劣化要因変数は、普通車・大型車の影響を考慮した交通量の劣化要因変数を導入した変数マルコフモデルに導入することで、交通量、塩害の影響を考慮した統合モデルを構築し、これにより複合劣化予測を行う。解析結果として、図-9 に大型車 1~5 千台/24h、普通車 2~3 万台/12h、離岸距離 1.0km 以上のとき、図-10 に大型車 1 万台/24h 以上、普通車 4 万台/12h 以上、離岸距離 1.0km 以上のときの推定劣化曲線と実データとの比較をそれぞれ示す。推定劣化曲線と若干のずれは生じたものの、劣化の傾向は定性的に捉えるこ

とができたと考える。

7. おわりに

本論は、道路資産として重要な位置を占める橋梁の維持管理計画支援ツールとして、データベース機能と橋梁定期点検データから得られる情報を入力項目とし床版の劣化予測を行う機能から成る、橋梁維持管理システムの構築を目的としてきた。ここで得られた結果まとめると以下ようになる。

橋梁に関する図面、橋梁台帳、点検データを整理し、収録項目を関連付けることで素早い検索が可能となった。また、橋梁の現状を一連の流れとして把握することができるデータベースを構築することができた。さらに、3DCG モデルを組み合わせることで、複雑に入り組んだ部材もどこに位置するか容易に確認できるシステムとした。これにより、橋梁の補修・補強計画の立案のための橋梁維持管理システムを提案することができた。

劣化予測では、実際の橋梁定期点検データよりマルコフモデルを推定し、これより平均的な床版の劣化曲線を得ることが出来た。そして、実データより大型車・普通車交通量の影響、理論式より塩害の影響を算出し、劣化要因変数として推定したマルコフモデルに順次導入することで、複数の劣化要因を考慮した統合モデルを構築し、個々の橋梁に対応した劣化予測を行うことが定性的にはあるが可能になった。ただし、本論で利用した約 70 橋の橋梁定期点検データは、都市部のデータでありかつ離岸距離も全て 1.0km 以上であることから、塩害の影響に関しては十分に反映させることができたとは言い難い。沿岸部橋梁定期点検データを数多く入手し、さらなる精度の確認を行うことが課題として残されている。

一方、本論で提案したシステムは、定期点検データを随時入力することにより劣化予測の元になるマルコフモデルを修正することができる。よって、既存の多くの橋梁点検データから作成されるデータベースや更新データの蓄積によって、劣化予測の精度の向上が期待できるので、データベースの収録データ数を増やすことが必須である。

最後に、本研究を進めるに際し、実際に点検業務を行っている橋梁メンテナンス会社、建設コンサルタンツ会社の多くの技術者の方々から貴重な意見を聞くことができた。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 宮本文穂, 串田守可, 足立幸郎, 松本正人: Bridge Management System(BMS)の開発, 土木学会論文集, No.560/VI-34, pp.91-106, 1997.
- 2) 大島俊之, 三上修一, 佐藤誠, 丹波郁恵, 大友貴史, 藤井裕子: 遷移劣化確率を考慮した橋梁の劣化予測方法に関する研究, 土木学会第 57 回年次学術講演会, 2002.
- 3) 伊藤弘之, 高橋祐治, 古田均, 田丸伸一, 亀田学広: ライフサイクルコストを考慮したコンクリート橋梁群の最適維持管理計画の策定, 第 7 回システム最適化に関するシンポジウム後援論文集, 2001.
- 4) 近田康夫, 中山義隆, 廣瀬彰則: 橋梁補修代替案作成への GA 適用に関する一考察, 第 7 回システム最適化に関するシンポジウム講演論文集, 2001.
- 5) 内山典之, 平野廣和, 佐藤尚次: ニューラルネットワークによる健全度予測を考慮した橋梁維持管理データベースの構築, 土木学会関東支部第 30 回技術研究発表会公演概要集, I -58, 2003.
- 6) 内山典之, 平野廣和, 佐藤尚次: ニューラルネットワークによる劣化予測も考慮した橋梁維持管理システムの構築, 土木学会第 58 回年次学術講演会第 I 部門, I-449, 2003.
- 7) 建設省土木研究所: 橋梁点検要領(案), 土木研究所資料第 2651 号, 1988.
- 8) 内山典之, 西山真, 平野廣和, 佐藤尚次: 橋梁架設地点の地形を考慮した 3DCG による景観設計, 土木学会第 57 回年次学術講演会共通部門, CS2-001, 2002.
- 9) 森村英典, 高橋幸雄: マルコフ解析, 日科技連出版
- 10) 片脇清士: 最新のコンクリート防食と補修技術, 山海堂
- 11) 関博, 松井邦人, 松島学: コンクリート構造の寿命予測に関する一考察, コンクリート工学年次論文報告集, vol.12-1, 1990.
- 12) 土木学会コンクリート委員会: コンクリート標準示方書[施工編], 1999.

(2004 年 4 月 16 日 受付)