新都市社会技術融合創造研究会

インフラ資産評価・管理の最適化に関する研究プロジェクト

２００６年３月

目 次

1 はじめに **1**

1.1 本研究の目的 · · · · · 1

1.2 アセットマネジメント · · · · · 3

1.2.1 アセットマネジメントの役割 · · · · · 3

1.2.2 ライフサイクルコスト · · · · · 3

1.2.3 Bridge Management System(BMS) · · · · · 4

2 マネジメントシステムの開発に関する検討 **7**

2.1 劣化過程モデル · · · · · 7

2.2 推移確率の推計 · · · · · 10

2.2.1 統計的劣化予測モデル · · · · · 10

2.2.2 定期点検スキーム · · · · · 10

2.2.3 ハザードモデルの定式化 · · · · · 11

2.2.4 マルコフ推移確率の導出 · · · · · 13

2.2.5 マルコフ推移確率の推計方法 · · · · · 15

2.3 最適補修戦略の導出 · · · · · 17

2.3.1 ライフサイクル費用評価 · · · · · 17

2.3.2 モデル化の前提条件 · · · · · 17

2.3.3 劣化・補修過程のモデル化と部分的不可逆性 · · · · · 19

2.3.4 平均費用最小化モデル · · · · · 21

2.3.5 割引現在価値最小化モデル · · · · · 22

2.4 グルーピング · · · · · 24

2.5 劣化・補修シミュレーションモデル · · · · · 25

2.5.1 劣化・補修シミュレーション · · · · · 25

2.5.2 制約条件下のシミュレーション · · · · · 27

2.6 数学的事項 · · · · · 30

2.6.1 マルコフ推移確率p_{ij}の算出 · · · · · 30

2.6.2 完全エルゴード性 · · · · · 31

2.6.3 期待累積ライフサイクル費用$u_i^d(n)$の構造 · · · · · 31

3 資産会計システムの開発に関する検討 **34**

3.1 管理会計情報の目的 · · · · · 34

3.2 橋梁の資産評価と会計方式 · · · · · 35

3.2.1 管理会計情報 ・・・

1 はじめに

1.1 本研究の目的

近年，橋梁を安全かつ経済的に維持管理していくためのアセットマネジメントシステムに対するニーズが高まっている．わが国の橋梁は，高度成長期に建設されたものも多く，これらの橋梁が今後一斉に維持更新期を迎えることが予想される．これに伴い橋梁の維持補修需要も劇的に増加するであろう．一方，少子高齢化に伴う社会保障費の大幅な増大や税収の減少から，財政支出の削減が求められており，橋梁の維持管理予算も例外ではない．こうした状況の下，橋梁をはじめとする新規の社会資本整備のニーズに応えつつ，現存の橋梁を運用していくためには，橋梁の補修需要を的確に予測し，予算管理を効果的に実施するための橋梁のアセットマネジメントシステムを構築することが不可欠である．

橋梁の合理的な維持管理のためには，将来時点に発生する補修・更新需要をあらかじめ予測し，最適な補修・更新計画を長期的な視点において立案することが重要である．しかし，多くの不確実な状況下において供用される橋梁は，その劣化過程にも多くの不確実性を含んでいる．将来時点の補修需要予測やライフサイクル評価は，橋梁の劣化予測の精度に大きく依存しており，劣化予測モデルの開発が重要視される．さらに，橋梁の最適な補修政策はライフサイクル費用をはじめとする管理指標を用いて工学的に選定されることが望ましい．しかし，橋梁管理者は橋梁の維持管理のための最適な補修政策を実施できる予算を毎年確保できるとは限らず，限られた補修予算の中で，優先順位の高い橋梁部材から補修せざるを得ない場合も少なくない．当該年度に補修されなかった箇所に関しては，その補修が翌年度以降に先送りされることとなる．このように，橋梁の補修・更新に関する意思決定においても様々な要因を考慮した最適な戦略を求める必要がある．

これらの背景を踏まえ，本報告では橋梁の維持管理業務を合理的に執行するための橋梁マネジメントシステム（Bridge Management System：以下，BMSと略す）を開発する．さらに，本システムを橋梁管理の実務において運用するために，パソコン上での操作を可能とするアプリケーション（以下，BMSアプリケーションと呼ぶ）の開発を試みる．具体的には，定期的に実施される点検業務から獲得されるデータを用いた橋梁の健全度評価及び劣化予測を行う手法論について検討し，さらに将来時点において発生する補修・更新需要を予測し，計画的な維持管理業務を遂行するための有用な情報として，長期的な予算計画の立案，最適補修戦略の導出，さらには事業執行のモニタリング機能として管理会計情報を導出するためのシステムを開発する．適用事例として，国土交通省近畿地方整備局姫路河川国道事務所が管轄する橋梁システム群のマネジメント業務について考察する．

以下，本研究の全体フローを示す.

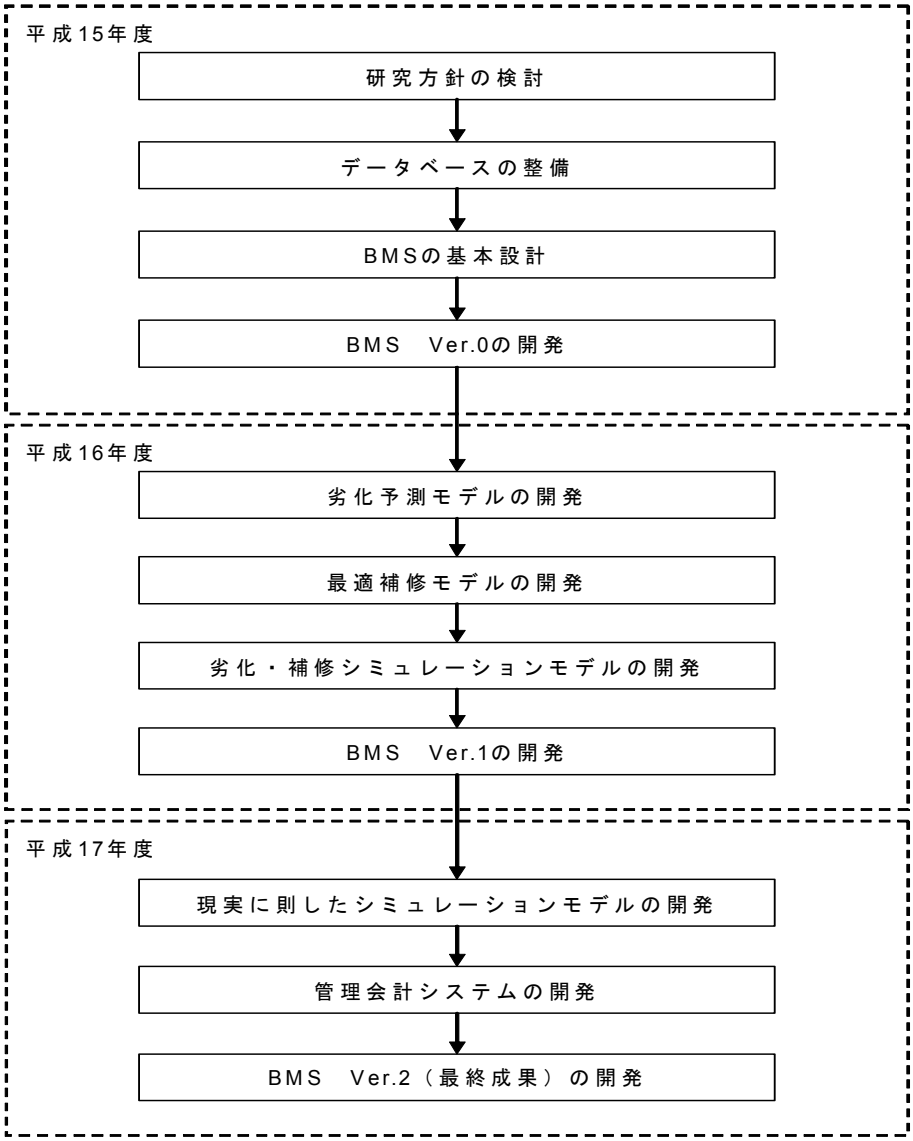


図１－１　本研究の全体フロー

1.2 アセットマネジメント

1.2.1 アセットマネジメントの役割

社会資本は，国土の保全，産業活動の基盤，生活環境の質的向上など多側面にわたって社会・経済の発展に寄与する国民共有の資産（アセット）であり，我々はその有効活用と保全を図り，将来世代に継承していく義務がある．

我が国では明治以来，社会資本の整備が進展し，現在に至るまでそのストックは膨大な量に及んでいる．高度成長期に蓄積された社会資本の中には，構造的な劣化や経済的・機能的な陳腐化の進行により，早急に補修・更新を必要とするものも少なくない．今後は，更なる補修・更新需要の増大が予想される．旧経済企画庁による試算によると，新規改良実質投資額の年間伸び率を3%とすると，投資額に占める維持補修・更新比率は2010年で36社会資本のアセットマネジメントでは，限られた投資で最大の効果をもたらす最も有効な構造物機能の維持・向上対策を立案・推進していく必要がある．そこでは，施設の安全性や健全性を維持しつつ，施設の維持管理に必要な中長期的な費用，すなわちライフサイクルコストを可能な限り低減するようなマネジメント戦略を立案することが課題となる．しかし，社会資本は維持・補修を一時的に先送りしても，社会資本のサービス水準の低下が直ちには顕在化しないことから，ともすれば必要な維持・補修予算を一律に削減され，補修予算が将来に繰り越される可能性がある．補修のために十分な予算が確保されなければ，社会資本のサービス水準を適切に維持することは不可能となる．社会資本の健全度や資産価値を体系的に把握・評価するためのインフラ資産会計や管理会計システム等の情報適用機能の整備を通じて，長期的維持管理計画の策定ならびに安定的な財源確保を目指すことが不可欠である．

1.2.2 ライフサイクルコスト

アセットマネジメントにおいては，社会資本の耐用年数や劣化の過程とそれら不確実性を考慮に入れながら，社会資本から発生するライフサイクルコストを最小とするようなマネジメント戦略を立案することが課題となる．社会資本のライフサイクルコストとは，計画，設計，施工，運営，維持・管理，廃棄あるいは再利用といったライフサイクルの各段階において発生する費用の総現在価値のことである．

これまでの社会資本に関する経済評価では，社会資本の整備によってもたらされる便益の計量化に主眼が置かれ，費用に関してはそれほど詳細に検討されてこなかった．近年，財源の逼迫や新規社会資本の限界便益の縮小が顕在化し，これまでの新規の社会資本整備から既存の社会資本の有効活用へとマネジメントの重点をシフトせざるを得ない状況になっている．また，老朽化が進む社会資本の保全に要する補修・更新費用は今後大幅に増

大することが予測されている．こうした状況下で，既存の社会資本に対する効率的な維持・管理，更新戦略の実施によるライフサイクルコストの軽減が期待されている．また，新規に整備を実施するとしても，将来発生する維持管理費用を軽減するような施策を実施しておかなければ，将来新たに必要となる社会資本整備や既存施設の維持管理のための財源を圧迫する恐れがある．こうした理由により，より積極的にライフサイクル費用の評価に取り組む必要がある．

いつ，いくら初期投資するのか，どのタイミングでどれぐらいの頻度で補修を行うのか，サービス水準をどのレベルに設定するのか，耐用年数を何年に設定するのかなど，様々な意思決定の結果に応じて，ライフサイクルコストの値は決定される．適切なマネジメントを実施した場合，ライフサイクルコストの低減が達成される．アセットマネジメントにおいては，ライフサイクルコストは単なる費用そのものとしてではなく，マネジメント施策の経済評価のための統一的な管理指標としての機能を有する．

近年，ライフサイクルコストの削減を目標とするアセットマネジメントに関する研究が進展している．２章では，劣化過程の不確実性を考慮した上で，最適な維持補修政策とライフサイクルコストを同時に決定することのできる維持補修モデルを提案する．

1.2.3 Bridge Management System(BMS)

我が国では，橋梁施設の高齢化が深刻な問題となっている．その進展は加速度的で，建設後50年以上経過した橋梁数が2011年には2001年時点の約4倍，2021年には約17倍に達するという試算も報告されており，今後は維持・更新需要の大幅な増大が予想される．橋梁を安全かつ経済的に維持管理していくための橋梁管理システム(BMS)の構築が急務である．BMSとは，橋梁に関わる全ての行為である計画，設計，施工，点検，劣化診断，補修，補強，架替を経済性や品質，安全性，機能性などの観点から適切に実行するための支援システムである．本報告では，特に，ライフサイクル費用を最小とするような最適維持管理計画を橋梁管理者が立案し，実施していくための意思決定支援システムの構築を目標とする．

BMSには,「現状把握⇒計画立案⇒実行⇒評価⇒現状把握」といったマネジメントサイクルを反映したものが望まれる．また，効率的な橋梁システム全体のマネジメントを実行するための計画案は，時間的相違性を考慮したいくつかの計画案によって構成されるべきと筆者は考える．例えば，短期的視野に基づく計画案は，長期的視野に基づくものに比べて，橋梁マネジメントの実行に重点が置かれるべきであり，その逆は，橋梁マネジメントのベンチマークを明示したものであることが望まれよう．当然のことながら，各々の計画案は時間的相違性を有する一方で，橋梁管理者による管理方針に沿い，一貫性を持つものでなければならない．このような考えに基づき，本報告では階層的マネジメントサイクル

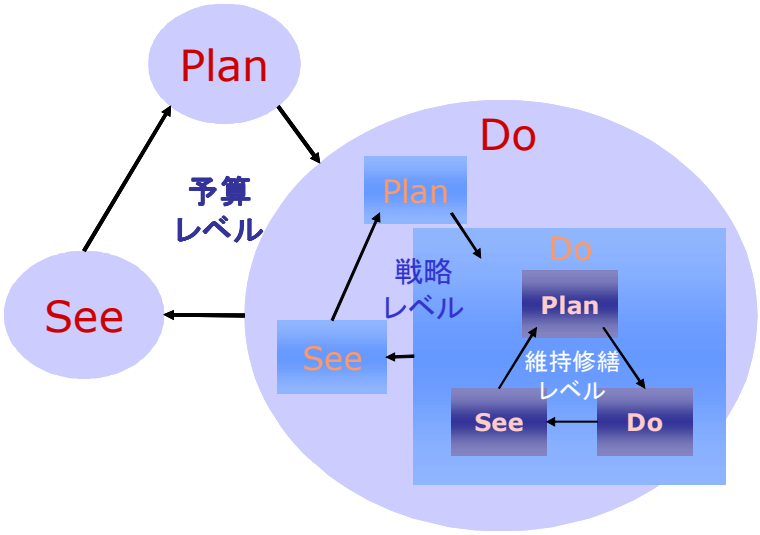


図１－２　階層的マネジメントサイクル

に着目し，橋梁マネジメントの実態を踏まえた上で，戦略レベル（長期計画），戦術レベル（中期計画），維持補修レベル（単年度計画）の３つのレベルで構成される階層的マネジメントサイクル（**図１－２**）を基に，BMSを構築する．その中で,「Plan-Do-See」というマネジメントサイクルを明示することにより，を現状把握・計画立案・実行・評価というマネジメントの要素を時間的相違性が考慮されたそれぞれのレベルで検討することが可能となっている．同時に，近年のNPMの潮流を反映したものとなっている観点からも，橋梁マネジメントに適したものと言えよう．

以上を基に，本報告では**図１－３**に示すBMSを提案する．本システムは３つのサブシステムにより構成される．台帳システムは，諸元データ，点検データ，補修工法データ，劣化予測データと最適戦略データを管理するモジュールにより構成され，個々の橋梁とその部材に関するデータを管理し，橋梁システム全体をシステムの現状を一元的に把握することのできるものとなっている．また，システム内部には，現状の点検データに基づいて，不確実性を有する橋梁の劣化過程を確率的に推計することのできる機能（詳細は，**４．２．１項**参照），また構成部材の状況依存的な最適戦略を**３章**で提案する最適化モデルにより求める機能を備えており，これらは本システムの特長的な機能である．

アセットマネジメントシステムは前述した階層的マネジメントサイクルに基づくものであり，台帳システムに蓄積された橋梁システム全体のデータ，管理会計システムによるアウトプットを基に，橋梁管理者による橋梁システム全体にまたがる効率的な維持管理計画の立案を支援するものである．戦略レベルでは，まず，橋梁システム全体を構成する橋梁を長期的な維持管理方針によりグルーピングを行う（グルーピングモジュール）．さらに，グルーピングを反映させて，モンテカルロ法を用いた劣化・補修シミュレーション実験を

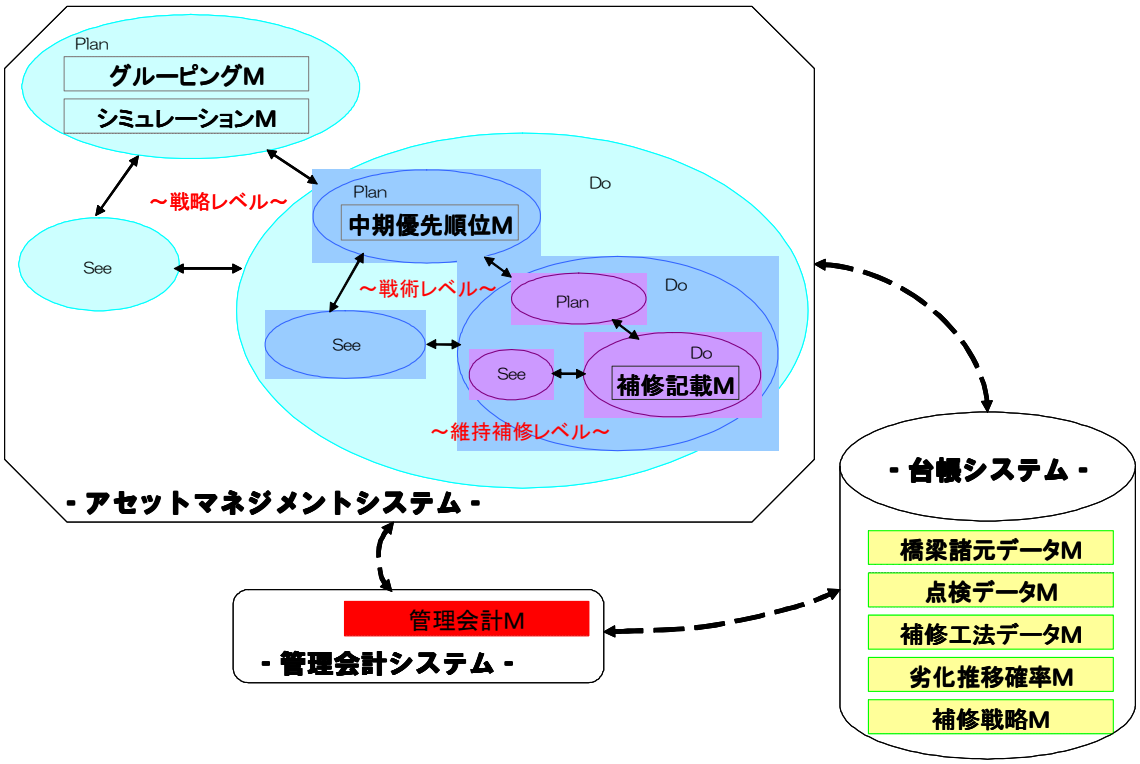


図１－３　橋梁マネジメントシステム

行うことにより，長期的な橋梁の劣化状態に加えて会計情報をシミュレートした結果が明示され，橋梁の長期的な維持管理計画立案を支援することができる（シミュレーションモジュール）．戦術レベルでは，最新の点検データに基づき，戦略レベルで作成された維持管理計画案を視野に入れつつ（中期優先順位モジュール），中期的に補修対象となる橋梁を挙げて序列化を行うことにより橋梁システム全体の中期的な維持管理計画を立案する．さらに，維持補修レベルでは，年次予算の範囲で補修工事が計画され，実際に補修が行われた橋梁と補修の内容を記録し，台帳システムや長期的・中期的維持管理計画案の双方に漸次フィードバックする（補修記載モジュール）．管理会計システムでは，橋梁システム全体の管理状態を他のサブシステムにより集計，把握した上で，繰延維持補修会計原則に基づく橋梁マネジメントのための管理会計情報を記録し，橋梁管理者が維持補修に必要な予算獲得を支援することができる．

2　マネジメントシステムの開発に関する検討

マネジメントシステムでは，まず点検データベースに蓄積された履歴より劣化過程の予測を行い，その結果を用いてライフサイクル費用の最小化が実現するような最適維持補修戦略を導出する．さらに現実的な問題である予算の制約を与え，各補修箇所の優先順位を決定する．優先順位の決定方法としては費用便益比の高いものから行うルールや劣化水準の高いものから行うルールなどが考えられるが，目的に応じて使い分けることも可能である．本報告では，平均損初度や補修の未達成率等から．優先順位を決定することにより，長期的に橋梁の劣化状態を安全かつ経済的な水準に保持することが可能な維持管理のための予算水準や，長期的な維持管理水準の推移を視覚的に理解することができる．それらの結果を用いることにより，上位アセットマネジメントに対して予算計画の提案を行うことも可能である．また，予想と異なる劣化過程をたどったとしても，再計算を行うことにより迅速な対応が可能である．

2.1　劣化過程モデル

橋梁管理者は，初期時点$t=0$から無限に続く離散時点t $(t=0,1,\cdots)$において，橋梁のアセットマネジメントを実施する．橋梁の補修計画を考える上で，まず劣化の不確実性を表現することが重要になってくる．橋梁の劣化状態（以下、健全度と言う）は複数の離散状態で評価される．例として,『橋梁点検要領（案)』に基づく健全度の判定基準を**表２－１**に示す.

表２－１　損傷度判定標準

状態区分	一般的状況
OK	点検の結果から，損傷は認められない．
IV	損傷が認められ，その程度を記録する必要がある．
III	損傷が認められ，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，補修を行うかどうかの検討を行う必要がある．
I	損傷が著しく，交通の安全確保の支障となる恐れがある．

今，ある橋梁部材の劣化に関する履歴が**図２－１**に示すように与えられたとしよう．同図は，部材が補修されずに放置された時に，劣化がどのように進展するかを表したものである．現実には，部材の劣化過程には不確実性が含まれ，しかも健全度は時間軸上の限られた時刻で実施される目視検査を通じてのみ知ることができる．図中，時刻τはカレンダー上の実時刻（以下，時刻と呼ぶ）を表す. 時刻τ_0で橋梁の供用が開始された直後から劣化が始まる．部材の健全度がJ個のレーティングで記述される場合を考えよう．部材の健全度を表すレーティングを状態変数i $(i=1,\cdots,J)$で表現しよう．部材がもっとも健全な（劣化が進展していない）状態を$i=1$で表し，状態変数iの値が大きくなるほど，劣化が進展していることを表す．$i=J$の場合，当該の部材が使用限界に到達していることを表す．**図**

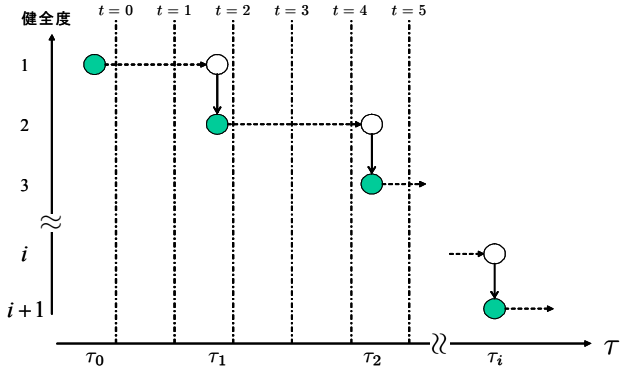


図２－１　状態の時間的推移と定期点検

２－１の例では，時間軸上の離散時刻τ_i $(i=1,\cdots,J-1)$において，それぞれ健全度がiから$i+1$に進展している．以下，時刻τ_iは「健全度がiから$i+1$へ推移する時刻」を表す．橋梁の管理者は，離散時点t $(t=0,1,\cdots)$において，各部材の健全度を観察しながら，当該部材に対し，健全度を回復するために補修を実施するか否かを決定するものとする．このような離散的状態の劣化過程モデルとして従来からマルコフ連鎖モデルが提案されている．マルコフ連鎖モデルでは，劣化過程を状態間におけるマルコフ推移確率として表現する．マルコフ推移確率は，構造物の劣化過程が過去の劣化履歴に依存しないという性質を持っており，操作性が高く，米国の標準的な橋梁マネジメントシステムの１つであるPONTISなどをはじめとして，多くの橋梁マネジメントにおける劣化予測モデルとして用いられている．本研究会でも劣化過程モデルとしてマルコフ連鎖モデルを採用する．

ある部材の劣化状態を離散的な$J(\geq 2)$個の状態で定義される状態空間で記述する．部材の劣化過程は状態空間$S=\{1,2,\cdots,J\}$上で定義される斉次マルコフ連鎖$\{h(t)\}$に従うと仮定する．今，時点tで部材の状態がiである時，時点$t+1$に状態jに推移する時の確率を

$$\mathrm{Prob}[h(t+1)=j|h(t)=i]=p_{ij}$$

と表そう．道路橋における部材の劣化推移確率行列$\boldsymbol{P}$は

$$\boldsymbol{P}=\begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1J} \\ 0 & p_{22} & \cdots & p_{2J} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & p_{JJ} \end{pmatrix}$$

と表すことができる．ここで推移確率行列$\boldsymbol{P}$の構成要素であるp_{ij}は，推移確率であるので，非負の値をとる．ただし，構造物の劣化状態は補修が無い限り改善することはないので，$p_{ij}=0(i>j)$が成立する．また，推移確率の定義より$\sum_{j=1}^{J}p_{ij}=1$が成立する．状態Jは構造物を供用していくにあたって，早急な処置が必要となることを意味しており，補修が無い限りはマルコフ連鎖における吸収状態となる．すなわち$p_{JJ}=1$が成立する．

最後に劣化過程モデルとして以下のことを仮定しておく．橋梁における各部材の劣化進行の間に相互関係は無いものとする．道路橋の各部材は，部材種別，材質，環境，劣化機構等の様々な要因により異なった劣化過程をたどる．また，道路橋の各部材における劣化過程が，部材種，及び損傷形態に依存するものする．

2.2 推移確率の推計

橋梁のアセットマネジメントでは，ライフサイクル費用の低減化が図れるような最適補修戦略を求めることが重要な課題である．その上で，将来時点における橋梁の補修需要を予測し，橋梁の維持補修のために要する予算計画を策定することが必要となる．橋梁の劣化予測モデルは，ライフサイクル費用や補修需要を推計するために重要な役割を果たす．本研究会では，個々の橋梁部材の目視検査により判定された劣化情報に基づいて，橋梁劣化のマルコフ推移確率を求める方法を採用する．

2.2.1 統計的劣化予測モデル

橋梁部材の劣化予測モデルとして，1）過去の目視検査結果に基づいた統計的な劣化予測モデル，2）力学的メカニズムに基づいた劣化予測モデルが提案されている．対象となる問題によって，いずれの劣化予測モデルを用いるべきかが決定される．具体的な劣化箇所の余寿命や補修戦術を求める場合，力学的メカニズムに基づいた予測モデルが有効であろう．しかし，力学的メカニズムに基づく予測方法では，橋梁を取り巻く不確定な環境や使用要因が予測結果に対して支配的なパラメータとなることが多いために，統計的予測モデルを用いざるを得ない場合もある．また，管理橋梁は定期的な点検が義務付けられており，姫路河川国道事務所でも過去の点検結果が紙ベースで蓄積されており，現在，電子データへの移行が進められている．このような背景を考慮し，本研究会では，過去の点検結果に基づいた統計的劣化予測モデルを採用する．

2.2.2 定期点検スキーム

橋梁の劣化過程に関する情報は，目視検査を通じて獲得できる．いま，橋梁の定期検査により，橋梁部材の健全度に関する観測情報が獲得できる場合を考えよう．橋梁の供用開始後，定期的に目視検査されていれば理想的であるが，現実には継続的，かつ定期的な目視検査による観測結果を獲得することは難しい．ここでは，時間軸上の2つの時刻，において定期検査が実施された場合を考えよう．時刻の定期検査により，観察対象である部材の健全度がi $(i=1,\cdots,J-1)$であると判定されたとしよう．時刻τ_Aにおいて，将来劣化がどのように進展するかは不確実である．劣化過程として無限に多くのシナリオが考えられるが，現実にはその中から1つのパスが実現する．

いま，**図2－2**に示すような4つのサンプルパスを考えよう．パス1は，2つの定期検査時刻の間で健全度iが変化しなかった場合を表している．パス2とパス3では，それぞれ時刻τ_i^2, τ_i^3において，劣化が進展し健全度がiから$i+1$に変化している．これら2つのパスに従った場合，時刻τ_Bで観測された健全度は$i+1$となる．定期検査スキームでは，健全度がiから$i+1$へ推移した時刻τ_i^2, τ_i^3は判からない．さらに，パス4は，定期検査間に時刻

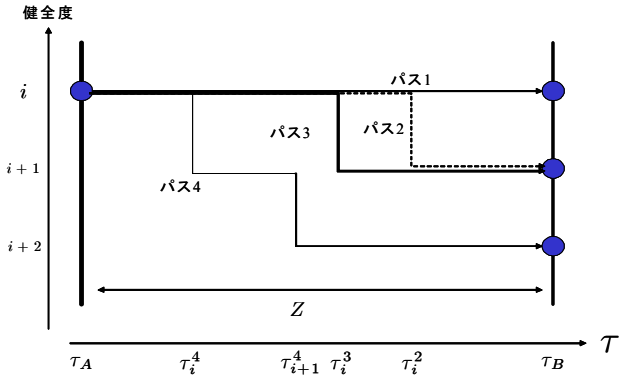


図２－２　健全度の定期点検スキーム

τ_i^4, τ_{i+1}^4という２つの時刻で健全度が変化した場合を表している．その結果，時刻τ_Bにおいて観測された健全度は$i+2$となる．定期検査では２つの定期検査時刻における健全度を観測できるが，健全度が変化した時刻に関する情報を獲得することは不可能である．

2.2.3　ハザードモデルの定式化

マルコフ推移確率を個別部材の劣化過程を表すハザードモデルを用いて定義しよう．目視点検により獲得できる観測情報には，個別部材の健全度だけでなく部材特性や橋梁の利用状態等，個別部材に特有な非集計データが含まれる．また，橋梁によって検査間隔が異なる場合もある．このような多様なデータに基づいてマルコフ推移確率を推計するためには，個別部材が有する多様性を考慮できる推計方法を開発することが望ましい．本研究会では，１）対象とするサンプルが有する個別情報に基づいて部材劣化のハザードモデルを推計し，２）その結果を用いてマルコフ推移確率を推計するという２段階の推計方法を採用する．

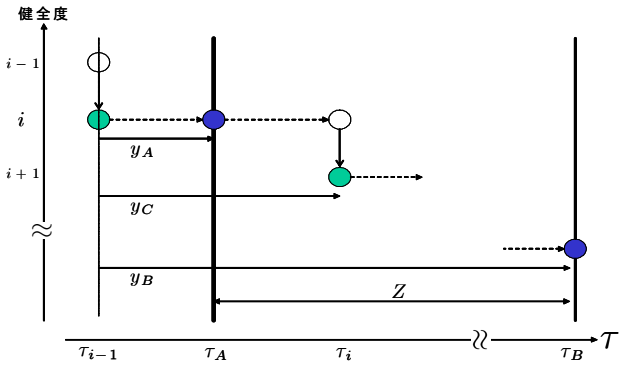


図２－３　劣化・点検過程のモデル化

ある橋梁部材の劣化過程をハザードモデルを用いて定式化しよう．ハザードモデルを簡単に紹介する．いま，ある橋梁部材の劣化過程と点検の関係を**図２－３**に示すように仮定する．カレンダー時刻τ_{i-1}において，健全度が$i-1$からiに推移したと考える．ここで，カレンダー時刻τ_{i-1}を初期時点$y_i=0$とする時間軸（以下，サンプル時間軸と呼ぶ）を導入しよう．サンプル時間軸上の時刻を，以下「時点」と呼び，カレンダー時間軸上の「時刻」とは区別する．検査時刻τ_A，τ_Bは，サンプル時間軸上の時点y_A，y_Bに一致する．当然のことながら，$y_A=\tau_A-\tau_{i-1}$，$y_B=\tau_B-\tau_{i-1}$が成立する．なお，定期検査スキームでは健全度iが始まったカレンダー時刻τ_{i-1}に関する情報を獲得できない．したがって，サンプル時間軸上の時点y_A，y_Bも正確に把握できない．いま，時刻τ_i（時点y_C）において，健全度がiから$i+1$に推移すると考えよう．この時，当該の部材の健全度がiに留まる期間長（以下，健全度iの寿命と呼ぶ）は$\zeta_i=\tau_i-\tau_{i-1}=y_C$と表せる．健全度$i$の寿命$\zeta_i$は確率変数であり，確率密度関数$f_i(\zeta_i)$，分布関数$F_i(\zeta_i)$に従うと仮定する．ただし，健全度$i$の寿命$\zeta_i$の定義域は$[0,\infty)$である．分布関数の定義より

$$F_i(y_i)=\int_0^{y_i} f_i(\zeta_i)d\zeta_i \tag{2.1}$$

が成立し，分布関数$F_i(y_i)$は健全度がiとなった初期時点$y_i=0$ (時刻τ_A)からサンプル時間軸上のある時点y_i(時刻$\tau_{i-1}+y_i$)までに健全度がiから$i+1$に変化した累積確率を表す．したがって，初期時点$y_i=0$からサンプル時点$y_i\in[0,\infty)$まで，健全度がiのまま推移する確率$\tilde{F}_i(y_i)$は，時点y_iまでに健全度がiから$i+1$に変化する累積確率$F_i(y_i)$を用いて

$$\mathrm{Prob}\{\zeta_i\geq y_i\}=\tilde{F}_i(y_i)=1-F_i(y_i) \tag{2.2}$$

と定義できる．ここで，部材の健全度が時点y_iまで状態iで推移し，かつ期間$[y_i,y_i+\Delta y_i)$中に水準$i+1$に進展する条件付き確率は

$$\lambda_i(y_i)\Delta y_i=\frac{f_i(y_i)\Delta y_i}{\tilde{F}_i(y_i)} \tag{2.3}$$

と表せる．いま，対象とする部材の健全度が時点y_iまでiの状態で推移し，かつ時点y_iで$i+1$に推移する確率密度$\lambda_i(y_i)$をハザード関数と呼ぶ．

橋梁部材の劣化過程がマルコフ性を満足し，ハザード関数がサンプル時間軸上の時点y_iに依存せず，常に一定値$\theta_i>0$をとると仮定する．すなわち，

$$\lambda_i(y_i)=\theta_i \tag{2.4}$$

が成立する．指数ハザード関数(2.4)を用いることにより，橋梁部材の劣化過程が過去の履歴に依存しないというマルコフ性を表現することが可能となる．ハザード関数$\lambda_i(y_i)=\theta_i$を用いれば，健全度iの寿命がy_i以上となる確率$\tilde{F}_i(y_i)$は

$$\begin{aligned}\tilde{F}_i(y_i)&=\exp\left[-\int_0^{y_i}\lambda_i(u)du\right]\\&=\exp(-\theta_i y_i)\end{aligned} \tag{2.5}$$

と表される．すなわち，指数ハザードモデルが得られる．また，健全度iの寿命分布を表す確率密度関数$f_i(\zeta_i)$は次式で示される．

$$f_i(\zeta_i) = \theta_i \exp(-\theta_i \zeta_i) \tag{2.6}$$

2.2.4 マルコフ推移確率の導出

いま，カレンダー時刻τ_{i-1}に健全度がiに推移し，検査時刻τ_Aまで健全度iが継続した場合を考えよう．すなわち，時刻τ_Aにおける検査の結果，健全度がiであるという観測結果が得られたとする．この時，サンプル時間軸上の時点y_Aで，健全度がiであったという条件の下で，さらに時点y_Aから追加的にz_i (≥ 0)以上にわたって健全度iが継続する確率$\tilde{F}_i(y_A + z_i|\zeta_i \geq y_A)$は

$$\begin{aligned} &\tilde{F}_i(y_A + z_i|\zeta_i \geq y_A) \\ &\quad = \mathrm{Prob}\{\zeta_i \geq y_A + z_i|\zeta_i \geq y_A\} \end{aligned} \tag{2.7}$$

と定義できる．確率$\tilde{F}_i(y_i)$の定義(2.2)より，

$$\frac{\mathrm{Prob}\{\zeta_i \geq y_A + z_i\}}{\mathrm{Prob}\{\zeta_i \geq y_A\}} = \frac{\tilde{F}_i(y_A + z_i)}{\tilde{F}_i(y_A)} \tag{2.8}$$

が成立する．式(2.5)より，上式の右辺は

$$\begin{aligned} \frac{\tilde{F}_i(y_A + z_i)}{\tilde{F}_i(y_A)} &= \frac{\exp\{-\theta_i(y_A + z_i)\}}{\exp(-\theta_i y_A)} \\ &= \exp(-\theta_i z_i) \end{aligned} \tag{2.9}$$

と変形できる．すなわち，検査時点y_Aにおいて健全度がiに判定され，次の検査時点$y_B = y_A + Z$においても健全度がiに判定される確率は

$$\mathrm{Prob}[h(y_B) = i|h(y_A) = i] = \exp(-\theta_i Z) \tag{2.10}$$

と表される．ただし，Zは２つの検査時点の間隔を表す．確率$\mathrm{Prob}[h(y_B) = i|h(y_A) = i]$はマルコフ推移確率$\pi_{ii}$に他ならない．すなわち，指数ハザード関数を用いた場合，推移確率π_{ii}はハザード率θ_iと検査間隔Zのみに依存し，時点y_A，y_Bに関する確定的な情報を用いなくても推移確率を推計することが可能となる．

指数ハザード関数を用いて，検査時点y_Aとy_Bの間に健全度がiから$i+1$に推移する確率を求めよう．２つの検査時点に挟まれた期間$[y_A, y_B)$の間に，健全度がiから$i+1$に移行する事象が生起するためには，１）時点y_Aから時点$s_i = y_A + z_i, (z_i \in [0, Z))$まで健全度が$i$のまま推移し，２）時点$y_A + z_i$において健全度が$i$から$i+1$に推移し，３）時点$y_A + z_i$から時点$y_B$まで，健全度$i+1$が継続しなければならない．定期検査では健全度が$i$から$i+1$に推移した正確な時点を把握できないが，いま仮に健全度の推移が時点$(y_A + \bar{z}_i) \in [y_A, y_B)$に生起し

たと考えよう．この時，検査時点y_Aにおいて健全度がiであるという条件の下で，時点y_Aから時点$y_A+\bar{z}_i$まで健全度がiに留まり，時点$y_A+\bar{z}_i$で健全度がiから$i+1$に推移する確率密度$g_i(\bar{z}_i|\zeta_i \geq y_A)$は

$$\begin{aligned} g_i(\bar{z}_i|\zeta_i \geq y_A) &= \frac{f_i(\bar{z}_i+y_A)}{\tilde{F}_i(y_A)} = \frac{\theta_i \exp\{-\theta_i(\bar{z}_i+y_A)\}}{\exp(-\theta_i y_A)} \\ &= \theta_i \exp(-\theta_i \bar{z}_i) \end{aligned} \tag{2.11}$$

と表せる．したがって，検査時点y_Aで健全度がiであり，かつ時点$y_A+\bar{z}_i$において健全度がiから$i+1$に変化し，かつ検査時点y_Bにおいて健全度が$i+1$と判定される条件付き確率密度$q_{i+1}(\bar{z}_i|\zeta_i \geq y_A)$は

$$\begin{aligned} & q_{i+1}(\bar{z}_i|\zeta_i \geq y_A) \\ &= g_i(\bar{z}_i|\zeta_i \geq y_A) \cdot \tilde{F}_{i+1}(y_B - \bar{z}_i - y_A) \\ &= \theta_i \exp(-\theta_i \bar{z}_i) \exp\{-\theta_{i+1}(Z-\bar{z}_i)\} \\ &= \theta_i \exp(-\theta_{i+1} Z) \exp\{-(\theta_i - \theta_{i+1})\bar{z}_i\} \end{aligned} \tag{2.12}$$

と表せる．以上の議論では，健全度がiから$i+1$に推移する時点$\bar{s}_i = y_A + \bar{z}_i$を固定していた．しかし，健全度$i$の寿命$\zeta_i$は確率変数であり，$\bar{z}_i$は範囲$[0, Z)$の中で変化しうる．２つの検査時点$y_A$と$y_B$の間で健全度が$i$から$i+1$に推移するマルコフ推移確率$p_{ii+1}$は次式で表せる．

$$\begin{aligned} & p_{ii+1} = \mathrm{Prob}[h(y_B) = i+1 | h(y_A) = i] \\ &= \int_0^Z q_{i+1}(z_i|\zeta_i \geq y_A) dz_i \\ &= \int_0^Z \theta_i \exp(-\theta_{i+1} Z) \exp\{-(\theta_i - \theta_{i+1}) z_i\} dz_i \\ &= \frac{\theta_i}{\theta_i - \theta_{i+1}} \{-\exp(-\theta_i Z) + \exp(-\theta_{i+1} Z)\} \end{aligned} \tag{2.13}$$

２つの検査時点の間に健全度がiからj $(j \geq i+2)$まで２つ以上変化する場合も同様の考え方を適用すると，検査時点y_Aとy_Bの間で健全度がiからj $(j \geq i+2)$に推移するマルコフ推移確率p_{ij}は若干の計算により

$$p_{ij} = \sum_{k=i}^{j} \prod_{m=i}^{k-1} \frac{\theta_m}{\theta_m - \theta_k} \prod_{m=k}^{j-1} \frac{\theta_m}{\theta_{m+1} - \theta_k} \exp(-\theta_k Z) \tag{2.14}$$

と導出できる（解説は**2.5.1**で行う．）．また，p_{iJ}に関してはマルコフ推移確率の制約条件より

$$p_{iJ} = 1 - \sum_{j=i}^{J-1} p_{ij} \tag{2.15}$$

が成立する．指数ハザードモデルに基づいて導出したマルコフ推移確率は以下のように整理できる．

$$p_{ii} = \exp(-\theta_i Z) \tag{2.16a}$$

$$p_{ii+1} = \frac{\theta_i}{\theta_i - \theta_{i+1}}\{-\exp(-\theta_i Z) + \exp(-\theta_{i+1} Z)\} \tag{2.16b}$$

$$p_{ij} = \sum_{k=i}^{j} \prod_{m=i}^{k-1} \frac{\theta_m}{\theta_m - \theta_k} \prod_{m=k}^{j-1} \frac{\theta_m}{\theta_{m+1} - \theta_k} \exp(-\theta_k Z) \tag{2.16c}$$

$$p_{iJ} = 1 - \sum_{j=i}^{J-1} p_{ij} \tag{2.16d}$$

$$(i = 1, \cdots, J-1; j = i, \cdots, J)$$

2.2.5 マルコフ推移確率の推計方法

同種の橋梁の部材に関するK個の定期検査データが得られたとする．検査サンプルk $(k = 1, \cdots, K)$には，2個の連続する定期検査が実施されたカレンダー時刻τ_A^kとτ_B^kと，各検査で計測された部材の健全度のレーティング$h(\tau_A^k), h(\tau_B^k)$に関する情報が記述されている．検査サンプルにより，検査間隔が異なっていても差し支えがない．以上の検査データに基づいて，検査サンプルkの検査間隔を$Z^k = \tau_B^k - \tau_A^k$と定義する．さらに，2つの検査時刻における劣化推移パターン情報に基づいて，ダミー変数δ_{ij}^k $(i, j = 1, \cdots, J; k = 1, \cdots, K)$を

$$\delta_{ij}^k = \begin{cases} 1 & h(\tau_A^k) = i, h(\tau_B^k) = j\text{の時} \\ 0 & \text{それ以外の時} \end{cases} \tag{2.17}$$

と定義する．さらに，橋梁の劣化速度に影響を及ぼす，橋梁の構造特性や使用環境を表す特性ベクトルを$\boldsymbol{x}^k = (x_1^k, \cdots, x_M^k)$と表す．ただし，$x_m^k$ $(m = 1, \cdots, M)$は橋梁部材サンプルkのm番目の特性変数の観測値を表す．定期検査スキームの下で得られる検査サンプルkが有する情報は$\Xi^k = (\delta_{ij}^k, Z^k, \boldsymbol{x}^k)$として整理できる．

一方，橋梁部材サンプル$k = (k = 1, \cdots, K)$の劣化過程を指数ハザード関数

$$\lambda_i^k(y_i^k) = \theta_i^k \ (i = 1, \cdots, J-1)$$

を用いて表現しよう．健全度Jはマルコフ連鎖の吸収状態であり$p_{JJ} = 1$が成立するためハザード率は定義されない．橋梁の劣化過程を特徴づけるハザード率θ_i^k $(i = 1, \cdots, J-1; k = 1, \cdots, K)$は橋梁部材の特性ベクトルに依存して変化すると考え，ハザード率θ_i^kを特性ベクトル$\boldsymbol{x}^k$を用いて

$$\theta_i^k = \boldsymbol{x}^k \boldsymbol{\beta}_i' \tag{2.18}$$

と表そう．ただし，$\boldsymbol{\beta}_i = (\beta_{i,1}, \cdots, \beta_{i,M})$は未知パラメータ$\beta_{i,m}$ $(m = 1, \cdots, M)$による行ベクトルである．記号$\prime$は転置操作を表す．マルコフ推移確率の推計手順の第 1 段階では，検査サンプル情報Ξ^k $(k = 1, \cdots, K)$に基づいて指数ハザード関数$\lambda_i^k(y_i^k) = \theta_i^k$を推計することになる．

検査サンプルkに関して獲得できる情報は$\Xi^k = (\bar{\delta}_{ij}^k, \bar{Z}^k, \bar{\boldsymbol{x}}^k)$である．記号「$\bar{}$」は実測値であることを示す．マルコフ推移確率は指数ハザード関数を用いて式(2.16a)-(2.16d)のように表すことができる．マルコフ推移確率には各健全度におけるハザード率θ_i^k $(i = 1, \cdots, J-1; k = 1, \cdots, K)$が含まれるが，ハザード率は橋梁部材の特性ベクトル$\bar{\boldsymbol{x}}^k$を用いて式(2.18)で表現できる．また，劣化推移確率はデータが観察された検査間隔$\bar{Z}^k$にも依存する．このことを明示的に表すため推移確率p_{ij}を目視検査による実測データ$(\bar{Z}^k, \bar{\boldsymbol{x}}^k)$と未知パラメータ$\boldsymbol{\beta} = (\boldsymbol{\beta}_1, \cdots, \boldsymbol{\beta}_{J-1})$の関数として$p_{ij}(\bar{Z}^k, \bar{\boldsymbol{x}}^k : \boldsymbol{\beta})$と表そう．いま，$K$個の橋梁部材の劣化現象が互いに独立であると仮定すれば，全検査サンプルの劣化推移パターンの同時生起確率密度を表す対数尤度関数を

$$\begin{aligned} \ln[\mathcal{L}(\boldsymbol{\beta})] &= \ln \left[\prod_{i=1}^{J-1} \prod_{j=i}^{J} \prod_{k=1}^{K} \left\{ p_{ij}(\bar{Z}^k, \bar{\boldsymbol{x}}^k : \boldsymbol{\beta}) \right\}^{\bar{\delta}_{ij}^k} \right] \\ &= \sum_{i=1}^{J-1} \sum_{j=i}^{J} \sum_{k=1}^{K} \bar{\delta}_{ij}^k \ln \left[p_{ij}(\bar{Z}^k, \bar{\boldsymbol{x}}^k : \boldsymbol{\beta}) \right] \end{aligned} \tag{2.19}$$

と表わせる．検査データ$\bar{\delta}_{ij}^k$, $\bar{Z}^k$, $\bar{\boldsymbol{x}}^k$はすべて確定値であり，対数尤度関数は未知パラメータ$\boldsymbol{\beta}$の関数である．ここで，対数尤度関数(2.19)を最大にするようなパラメータ値$\boldsymbol{\beta}$の最尤推定量は

$$\begin{aligned} &\frac{\partial \ln[\mathcal{L}(\hat{\boldsymbol{\beta}})]}{\partial \beta_{i,m}} = 0, \\ &\quad (i = 1, \cdots, J-1; m = 1, \cdots, M) \end{aligned} \tag{2.20}$$

を同時に満足するようなパラメータ推定量$\hat{\boldsymbol{\beta}} = (\hat{\beta}_{1,1}, \cdots, \hat{\beta}_{J-1,M})$として与えられる．最適化条件は$(J-1)M$次の連立非線形方程式であり，Newton法を基本とする逐次反復法を用いて解くことができる．

2.3 最適補修戦略の導出

2.3.1 ライフサイクル費用評価

橋梁管理者は，橋梁の健全度判定や診断の結果から補修・補強工法を選定し，限られた予算内で最大の効果を得るようなマネジメントを行わなければいけない．マルコフ決定モデルを用いて最適橋梁補修モデルを定式化する場合，ある補修戦略を採用した場合に発生するライフサイクル費用を評価することが必要となる．ライフサイクル費用評価法として，1）ライフサイクル費用の割引現在価値を評価する割引現在価値法，2）割引率を用いずライフサイクル費用を直接評価する非割引現在価値法がある．このうち，割引現在価値法は，異なる将来時点に発生する費用に対して割引率という重みをかけることにより，現在価値として集計化する方法である．割引現在価値法は既往の最適補修モデルや米国の代表的な橋梁マネジメントシステムの１つであるPONTISにおいても採用されている．橋梁マネジメントでは，適切な維持管理を通じて橋梁の長寿命化を達成し，費用縮減を図ることが重要である．しかし，割引現在価値法に基づいたライフサイクル費用の比較では，橋梁の長寿命化戦略の経済効率性を正当化できない場合が存在する．このような問題を回避するために，割引率を用いずにライフサイクル費用を直接評価する方法が用いられる場合も少なくない．本研究会では，橋梁管理者が橋梁を半永久的に維持すべき資産と位置づけた場合には，ライフサイクル費用を毎年等価な平均費用の流列として評価する方法（以下，平均費用法と呼ぶ）を採用し，その平均費用を最小にするような橋梁の最適補修戦略を求めるためのマルコフ決定モデル（以下，平均費用最小化モデルと呼ぶ）を採用する．

2.3.2 モデル化の前提条件

橋梁管理者は，初期時点$t=0$から無限に続く各時点t $(t=0,1,\cdots)$において，橋梁のアセットマネジメントを実施する．橋梁は無限期にわたり供用され，橋梁に対する要求性能レベルは一定に保たれると考える．各時点tの直前に目視検査により，橋梁各部材の健全度が判定され，その結果に基づいて時点tの直前に補修アクションが実施されると考える．橋梁は数多くの部材で構成されているが，その中のある特定の部材の劣化過程に着目しよう．対象とする部材の健全度はJ個の離散的なレーティングi $(i=1,\cdots,J)$で表され，部材の劣化が進むにつれてiの値が大きくなると考えよう．健全度$i=J$は最悪の健全度である．健全度がJになれば，その部材は直ちに取り替えられると考える．部材の健全度の推移過程は不確実であり，将来生起する状態を確定的に予測することはできない．橋梁管理者は，部材の健全度をモニタリングし，劣化が進展すれば補修により部材の健全度を回復する．その場合，橋梁管理者は事前に定められたルールに従って，橋梁部材の健全度に応じた補

修工法を選択する．橋梁管理者がある健全度に対して，採用すべき補修工法を指定するルールを「補修アクション」と呼ぶ．

いま，補修戦略$d \in D$を，各健全度iに対して，その時点で実施する補修アクションを指定する一連のルールとして定義しよう．ただし，Dは補修戦略の集合である．補修戦略dを構成する補修アクション$\eta^d(i) \in \Theta(i)$は，健全度iに対して補修を実施し，健全度が$\eta^d(i)$に推移することを意味する．たとえば，補修アクション$\eta^d(i) = j$は健全度がiの時に補修を実施し，健全度がjに回復することを意味する．また，集合$\Theta(i)$は健全度がiの場合に利用可能な補修工法（すなわち，補修アクション）の集合を表している．健全度$i\ (i = 1, \cdots, J)$のそれぞれに対して採用されるべき補修アクションの内容を指定した補修アクションベクトル$\boldsymbol{\eta}^d$を，

$$\boldsymbol{\eta}^d = \left(\eta^d(1), \cdots, \eta^d(J)\right) \tag{2.21}$$

と表そう．補修アクション集合$\Theta(i)\ (i = 1, \cdots, J)$の中には，「補修をしない」という補修アクションも含まれる．健全度iの時に補修をしないというアクションが選択される場合には$\eta^d(i) = i$と表される．健全度が最悪のランクJに到達した場合，その部材は必ず新しい部材に更新される．すなわち，$\eta^d(J) = 1$が成立すると仮定する．つぎに，補修アクション$\boldsymbol{\eta}^d$を実施する場合に必要となる補修費用を費用ベクトル$\boldsymbol{c}^d = (c_1^d, \cdots, c_J^d)$により表そう．費用$c_i^d$は健全度が$i$の場合に補修アクション$\eta^d(i)$を採用する場合に必要となる補修費用を意味する．健全度をiから$j\ (1 \leq j \leq i)$へ回復させるための補修費用をc_{ij}と表せば，$\eta^d(i) = j$の時，$c_i^d = c_{ij}$が成立する．補修を実施しない場合（$\eta^d(i) = i$が成立する場合）には$c^d(i) = c_{ii}^d = c$が成立する．cは定常的な清掃・維持費用である．ただし，補修費用は条件

$$\begin{aligned} &c_{kk} \leq \cdots \leq c_{jk} \leq \cdots \leq c_{Jk} \\ &(k \leq j \leq J; k = 1, \cdots, J) \end{aligned} \tag{2.22}$$

を満足すると仮定する．このことは補修前の健全度が悪い方が同一の健全度に回復するための費用が大きくなることを意味する．この時，補修戦略$d \in D$の内容は，各健全度iに対して採用する補修アクション$\eta^d(i)$と補修費用c_i^dの組$(i, \eta^d(i), c_i^d)\ (i = 1, \cdots, J)$により記述される．各健全度に対して利用可能な補修アクションの数は高々有限個である．補修戦略は各健全度に対して利用可能な補修アクションの組み合わせにより定義できるため補修戦略の数も有限となる．

2.3.3 劣化・補修過程のモデル化と部分的不可逆性

劣化過程には，２．１で述べたようにマルコフ推移確率行列

$$\boldsymbol{P}=\begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & \cdots & p_{1J} \\ 0 & p_{22} & \cdots & \cdots & p_{2J} \\ \vdots & \vdots & \ddots & & \vdots \\ \vdots & \vdots & & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \cdots & p_{JJ} \end{pmatrix} \tag{2.23}$$

で表現する．つぎに，補修戦略$d \in D$を構成する補修アクション$\eta^d(i)$により生じる施設の健全度の変化を

$$q_{ij}^d=\begin{cases} 1 & \eta^d(i)=j\text{の時} \\ 0 & \text{それ以外の時} \end{cases} \qquad (i,j=1,\cdots,J) \tag{2.24}$$

と定義する．つまり，補修が実施された後の健全度に確率１で推移し，補修が実施されない場合は，もとの健全度に確率１でとどまることを示している．以上の推移確率を$\boldsymbol{Q}^d$として整理することにより，

$$\boldsymbol{Q}^d=\begin{pmatrix} q_{11}^d & q_{12}^d & \cdots & \cdots & q_{1J}^d \\ q_{12}^d & p_{22}^d & \cdots & \cdots & q_{2J}^d \\ \vdots & \vdots & \ddots & & \vdots \\ \vdots & \vdots & & \ddots & \vdots \\ q_{J1}^d & q_{J2}^d & \cdots & \cdots & q_{JJ}^d \end{pmatrix} \tag{2.25}$$

となる．健全度がJの場合，当該部材は直ちに補修され

$$q_{J1}^d=1, \quad q_{Jj}^d=0 \ (j=2,\cdots,J-1) \tag{2.26}$$

が成立する．

通常のマルコフ連鎖モデルでは補修アクションにより，健全度間の移動が常に達成できることを想定している．しかし，現実には健全度があるレーティング以上に悪化した場合，当該の部材をとりかえない限り，健全度1まで回復することが不可能な場合が存在する．このように健全度間の移動に制約がある場合，劣化・補修過程が部分的に不可逆的であると呼ぶこととする．このような部分的不可逆性を表現するために，伝統的なマルコフ連鎖モデルを拡張しよう．

いま，時点tにおいて健全度がiと判定されたとする．次の時点$t+1$までに，健全度は推移行列$\boldsymbol{P}$に従って推移する．健全度がj $(j>i)$に推移した場合，補修戦略$d \in D$を用いて補修が実施される．言い換えれば，時点tから時点$t+1$に移行する過程で健全度が悪化し，戦略dの下で補修が必要と判断される場合には，時点$t+1$の直前に補修が直ちに実施されると

考える．ここで，健全度がJの時は必ず補修されるものとしているので，時点tにおいて状態Jは観測されない．このような部分的に不可逆な劣化・補修過程を表現するために，行列$\boldsymbol{P}$を

$$\boldsymbol{P} = \boldsymbol{P}^{-} + \boldsymbol{P}^{+} \tag{2.27}$$

と分解しよう．ただし，$\boldsymbol{P}^{-}$の(i,j)成分p_{ij}^{-}は，

$$p_{ij}^{-} = \begin{cases} p_{ij} & i = j\text{の時} \\ 0 & i \neq j\text{の時} \end{cases} \quad (i,j = 1,\cdots,J) \tag{2.28}$$

と定義される．また，$\boldsymbol{P}^{+}$の(i,j)成分p_{ij}^{+}は，

$$p_{ij}^{+} = \begin{cases} p_{ij} & i < j\text{の時} \\ 0 & \text{それ以外の時} \end{cases} \quad (i,j = 1,\cdots,J) \tag{2.29}$$

と定義される．さらに，補修戦略$d \in D$の下で時点tと時点$t+1$の間における補修アクションを考慮した健全度の推移確率行列$\boldsymbol{P}^{d}$を$(J \times J)$次行列

$$\boldsymbol{P}^{d} = \boldsymbol{P}^{-} + \boldsymbol{P}^{+}\boldsymbol{Q}^{d} \tag{2.30}$$

で表現しよう．式(2.30)の右辺第 1 項は時点tに健全度i $(i = 1,\cdots,J-1)$に到達しており，かつ時点$t+1$において健全度iが維持される場合には補修は実施されないことを意味している．一方，第 2 項は時点$t+1$の直前に健全度が悪化しランクiに到達した場合には補修戦略$d \in D$が適用されることを意味している．このように推移確率行列$\boldsymbol{P}^{d}$を$\boldsymbol{P}^{-}$と$\boldsymbol{P}^{+}\boldsymbol{Q}^{d}$に分解することにより，より上位の健全度から劣化により健全度iに推移した事象と，より下位の健全度j $(j > i)$から補修により健全度iに回復した事象を区別することが可能となる．ところで，これまでの議論により，$\boldsymbol{P}^{d}$の成分に関して，

$$p_{iJ}^{d} = 0 \ (i = 1,\cdots,J-1) \tag{2.31}$$

が成立する．すなわち，時点$t+1$の直前に健全度Jが観測されれば，直ちにその部材は更新されるため，時点$t+1$においては健全度Jが観測されることはない．そこで，補修を考慮した推移確率行列を，$\boldsymbol{P}^{d}$の$(J-1 \times J-1)$次行列

$$\tilde{\boldsymbol{P}}^{d} = \begin{pmatrix} p_{11}^{d} & \cdots & \cdots & p_{1J-1}^{d} \\ \vdots & \ddots & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ p_{J-11}^{d} & \cdots & \cdots & p_{J-1J-1}^{d} \end{pmatrix} \tag{2.32}$$

と縮約して表現することが可能である．以下，補修を考慮した推移確率行列$\tilde{\boldsymbol{P}}^d$として，式(2.32)で定義される$(J-1\times J-1)$次行列を用いることとする．さらに，推移確率行列$\tilde{\boldsymbol{P}}^d$が完全エルゴード性を満足すると仮定する（完全エルゴード性の説明は**2.5.2**）．たとえば，推移確率行列$\tilde{\boldsymbol{P}}^d$の(i,j)要素p_{ij}^d $(i\leq j)$がすべて$p_{ij}^d>0$の場合には完全エルゴード条件を満足する．完全エルゴード性は橋梁のライフサイクル費用評価が唯一に決定されるための必要十分条件である．

2.3.4 平均費用最小化モデル

いま，対象とする橋梁部材のマネジメント期間nを与件とし，期待累積ライフサイクル費用を$u_i^d(n)$と定義しよう．$u_i^d(n)$は，補修戦略$d\in D$の下で，時点$t=0$において初期健全度iの状態から時点$t=n$に至るまでの各期に発生するライフサイクル費用の総和に関する期待値を表している．十分大きなnに対して，$u_i^d(n)$は

$$u_i^d(n)=nq^d+v_i^d\ (i=1,\cdots,K-1) \tag{2.33}$$

と近似できる（証明は**2.5.3**）．すなわち，期待累積ライフサイクル費用$u_i^d(n)$は期間長nに比例する項と初期健全度iに依存する項に分解することができる．q^dは定常状態において生じる1期あたりの期待補修費用を表す（以下，平均費用と呼ぶ）．橋梁管理者は，初期時点$t=0$から無限に続く各年度t $(t=0,1,\cdots)$において，平均費用を最小にするように橋梁の維持管理を試みる．橋梁は数多くの部材で構成されているが，その中のある特定の部材の最適補修戦略を求める問題を考える．補修戦略dを用いた場合，時点nまでの期待累積ライフサイクル$u_i^d(n)$を用いて，時点nまでの平均費用を$u_i^d(n)/n$と表せる．ここで，マネジメント期間nを無限大に延長した平均費用$w^d(i)$を

$$w^d(i)=\lim_{n\to\infty}\frac{u_i^d(n)}{n} \tag{2.34}$$

と定義しよう．この時，平均費用$w^d(i)$の最小化を目的とする最適補修モデルは

$$w^{d^*}(i)=\min_{d\in D}\left\{\lim_{n\to\infty}\frac{u_i^d(n)}{n}\right\} \tag{2.35}$$

と定式化できる．式(2.35)は無限的視野のマルコフ決定モデルとなっている．平均費用最小化モデル(2.35)の最適補修戦略d^*を平均費用最小化原則に基づく最適補修戦略と呼ぶこととする．ここで，式(2.33)より，

$$w^d(i)=\lim_{n\to\infty}\left\{q^d+\frac{v_i^d}{n}\right\}=q^d \tag{2.36}$$

が成立することに着目しよう．すなわち，平均費用最小化原則に基づく最適補修戦略は，橋梁を半永久的に維持することを前提として，毎年等価な費用の流列として評価したラ

イフサイクル費用の最小化を達成するという特性を持っている．また，式(2.36)に示すように，最適平均費用は初期時点の健全度iに依存しない．nが十分大きい場合，期待累積ライフサイクル費用が

$$u_i^{d^*}(n) = v_i^{d^*} + nq^{d^*} \tag{2.37}$$

と表される．$v_i^{d^*}$はマネジメント期間nに関わらず一定である．平均費用最小化原則に基づいた最適補修戦略は，十分大きな任意のマネジメント期間nに対して定義される期待累積ライフサイクル費用$u_i^d(n)$の最小化も同時に達成していることが保証される．

2.3.5 割引現在価値最小化モデル

橋梁を半永久的に継続すべき資産（非償却性資産）と位置づけるマネジメント戦略は，数多くあるマネジメント戦略の 1 つに過ぎない．近い将来，橋梁の新設，機能向上といった施策を講じることが予定されている場合には，橋梁を非償却性資産と位置づけること自体に問題があろう．このようなマネジメント戦略に関しては，機能向上がもたらす便益も含めて割引現在価値を用いた費用便益分析を通じて検討することが必要となる．ここでは従来から用いられている，割引現在価値最小化原則に基づく最適補修モデル（以下，割引現在価値最小化モデルと呼ぶ）を，平均費用最小化モデルの特性を明確にするためにも定式化しておこう．ここでは，当該橋梁を半永久的に維持するための補修戦略について分析することを目的とし，橋梁の機能向上や長寿命化等の戦略は考慮しない．割引率をβと表そう．割引率に基づき算出される割引因子αは，

$$\alpha = \frac{1}{1+\beta} \tag{2.38}$$

と表される．現在時点tにおいて健全度がiであり，現在時点以後，割引現在価値最小化原則に基づいて最適に橋梁を補修することにより達成可能な期待ライフサイクル費用の割引現在価値の最小値（以下，最適割引現在価値と呼ぶ）を$\tilde{\psi}_i$と表そう．この時，$\tilde{\psi}_i$を再帰的に定義すれば，割引現在価値最小化モデルは

$$\tilde{\psi}_i = \min_{\tilde{d} \in D} \left\{ e_i^{\tilde{d}} + \alpha \sum_{i=1}^{K-1} p_{ij}^{\tilde{d}} \tilde{\psi}_j \right\} \tag{2.39}$$

を満足する最適補修戦略$\tilde{d}^*$を求める問題として定式化できる．すなわち，最適補修モデルは健全度iごとに最適アクション$\eta^{\tilde{d}^*}(i) \in \eta(i)$を求める問題となっている．さらに，平均費用最小化モデルは，割引現在価値最小化モデルにおいて割引率をゼロとした特殊ケースに相当することが理論的に証明されている．また，割引現在価値最小化モデル(2.39)を行列表示をすれば，

$$\tilde{\boldsymbol{\psi}} = \min_{d \in D} \left\{ \boldsymbol{e}^{\tilde{d}^*} + \alpha \tilde{\boldsymbol{P}}^{\tilde{d}^*} \tilde{\boldsymbol{\psi}} \right\} \tag{2.40}$$

と表せる．ただし，$\tilde{\boldsymbol{\psi}} = (\tilde{\psi}_1, \cdots, \tilde{\psi}_{K-1})'$は各健全度における最適割引現在価値$\psi_i$に関する列ベクトルを表している．最適割引現在価値は式(2.40)より

$$\tilde{\boldsymbol{\psi}} = \left[\boldsymbol{I} - \beta \tilde{\boldsymbol{P}}^{\tilde{d}^*}\right]^{-1} \boldsymbol{e}^{\tilde{d}^*} \tag{2.41}$$

と表される．なお，平均費用最小化モデルで求めた最適補修戦略のライフサイクル費用の割引現在価値の期待値$\boldsymbol{\psi} = (\psi_1, \cdots, \psi_{K-1})$も，平均費用最小化モデルで求めた最適戦略$d^*$を用いて

$$\boldsymbol{\psi} = \left[\boldsymbol{I} - \beta \tilde{\boldsymbol{P}}^{d^*}\right]^{-1} \boldsymbol{e}^{d^*} \tag{2.42}$$

と表せる．

2.4 グルーピング

橋梁システム全体を構成する個々の橋梁の立地条件，施工条件や供用条件等，その環境が全て均質であることは極めて稀である．そして橋梁管理者は，このような環境の異質性を考慮しながら，戦略的に維持管理計画を構築する．

例えば，ある管理者が２つの橋梁を管理しているものとしよう．この２つの橋梁は仕様，環境等が劣化状態を除いて全くの同一であるとしよう．劣化状態は，片一方の橋梁は供用に支障はなく極めて健全な状態を保たれているのに対し，片一方の橋梁は供用に支障をきたす寸前の極めて危険な状態となっている．この場合，管理者が維持補修のための予算を十分に確保できるのであれば双方の橋梁に対して常に最適補修戦略が実施されるので，一括して管理することに弊害は生じない．だが，管理者が維持補修のための予算制約を課せられており，かつ２つの橋梁を一括して管理していると，供用不能寸前の後者へ維持補修の予算が多大に費消される事態となることが想定され，良好な前者へは維持補修の予算が配分されにくくなる．長期的視野に立てば，前者の橋梁もいずれその状態が悪化し，予防的に補修する予算が確保されていれば保持できた状態を維持することができなくなる．このケースでは，前者の橋梁に対して，予防的な補修のための予算を確保しつつ，後者の橋梁に対しては，将来の更新を考慮しながら，供用に支障をきたさない程度に維持補修を継続することが，長期的な維持管理方針の一つとして考えられよう．

このように，橋梁管理者はその管理橋梁の現況や特性に応じて，個別橋梁毎の予算配分を，同質な維持補修戦略を持つ橋梁毎に決定することが考えれる．本システムでは，管理者による長期的な維持管理計画案に基づき，橋梁システム全体を構成する個別橋梁に対してグルーピングを実行する．ただし，本システムではグルーピングが極めてヒューリスティクに行われることを予め断っておく．つまり，個別橋梁に関する指標から自動的にグルーピングされることは考慮されていない．これは，グルーピングが単に定量化された指標から機械的に実行される性質のものではなく，高度な政策的判断を基に実行されるものであり，システム内でグルーピングを自動的に実行することが，賢明ではないと本報告では捉えていることに起因する．

2.5 劣化・補修シミュレーションモデル

2.5.1 劣化・補修シミュレーション

ある管理者の下に置かれている橋梁システム全体は，個々に様々な特性や補修戦略を持ち合わせた橋梁の集合であり，橋梁マネジメントを実行する際には，このような個々の橋梁の異質性を考慮しつつ，効率的な維持補修計画を立案する必要がある．本システムでは，個別橋梁のデータに基づく橋梁の劣化・補修シミュレーション実験を実行することにより，長期的な視野に立った橋梁システム全体の維持補修計画立案を支援する．またシミュレーションモデルは

グルーピングは管理者の高度な政策的判断の下に実行されていることを案ずれば，シミュレーションはグループ毎に実行されることが望ましい．よって以下では特に断らない限りは，政策上ある単一のグループに分類される橋梁システム全体を考えて議論を進める．この橋梁システム全体は，Ω橋の橋梁により構成されており，それぞれの橋梁を$\omega(\omega = 1,\cdots,\Omega)$と表現する．また，$\omega$番目の橋梁は$\Xi(\omega)$個の部材から構成され，それぞれの部材は$\xi_\omega(\xi_\omega = 1,\cdots,\Xi(\omega))$と表現される．つまり，橋梁システム全体の部材数$R$は$\Xi(\omega)$を用いて，

$$R = \sum_{l=1}^{\Omega} \Xi(l) \tag{2.43}$$

と表される．ここで，時刻tにおけるξ_ωというある橋梁ωの部材の健全度を状態変数$\gamma_{\xi_\omega}(t)$により表そう．このときある橋梁ωの健全度を健全度ベクトル，

$$\boldsymbol{\gamma}_\omega(t) = \{\gamma_1(t),\cdots,\gamma_{\Xi(\omega)}(t)\} \tag{2.44}$$

を用いて表現できる．さらに，橋梁システム全体の健全度ベクトルは，

$$\boldsymbol{\Gamma}(t) = \{\boldsymbol{\gamma}_1(t),\cdots,\boldsymbol{\gamma}_\Omega(t)\} \tag{2.45}$$

と表される．ω番目の橋梁を構成する一つの橋梁部材ξ_ωに着目する．橋梁部材ξ_ωの推移確率は，式 (2.23) による定義を拡張して，劣化推移行列$\boldsymbol{P}_{\xi_\omega}$と定義する．さらに，初期時点$t = 0$を現在時点と考え，橋梁システムの劣化過程をシミュレートする問題を考える．初期時点において，各橋梁部材の健全度が目視検査により観測され，その値が$\boldsymbol{\Gamma}(0)$であることが判明したとしよう．現時点において，将来時点での健全度を確定的に予測することはできない．ここで，初期時点からT期経過した時点$t = T$における部材ξ_ωの健全度の確率分布を$\boldsymbol{\mu}_{\xi_\omega}(T) = (\mu^1_{\xi_\omega}(T),\cdots,\mu^K_{\xi_\omega}(T))$と表す．ただし，$\mu^i_{\xi_\omega}(T)$は，$t = T$において，部材$\xi_\omega$の健全度が$i$となる確率を表している．この時，初期時点の健全度が$\gamma_{\xi_\omega}(0) = i$であった橋梁部材$\xi_\omega$の$T$期後の健全度分布は

$$\boldsymbol{\mu}_{\xi_\omega}(T) = \boldsymbol{e}_i\big(\boldsymbol{P}_{\xi_\omega}\big)^T \tag{2.46}$$

と表せる．ただし，$\boldsymbol{e}_i=(0,\cdots,0,1,0,\cdots,0)$は第$i$番目の要素のみが値1をとり，それ以外の要素がすべて値0をとる行ベクトルである．また，$(\boldsymbol{P}_{\xi_\omega})^T$は推移確率行列$\boldsymbol{P}_{\xi_\omega}$の$T$乗を表している．

劣化推移確率と同様に，不特定の橋梁部材に対して成された前節の定義を，ここで着目した橋梁部材ξ_ωに対して拡張しよう．以降は特に断らない限り，着目した橋梁部材ξ_ωに成された定義とみなし，これを明確にするために，橋梁部材を特定化するξ_ωを定義式に付与する．例えば，補修戦略は$d_{\xi_\omega}\in D_{\xi_\omega}$，補修アクションベクトルは式（2.21）により$\boldsymbol{\eta}^d_{\xi_\omega}$，費用ベクトル$\boldsymbol{c}^d_{\xi_\omega}$と表現される．

橋梁部材の補修戦略d_{ξ_ω}を考慮した場合，初期時点の健全度が$\gamma_{\xi_\omega}(0)=i$であった橋梁部材ξ_ωのT期後の健全度分布は

$$\boldsymbol{\mu}^{d_{\xi_\omega}}_{\xi_\omega}(T)=\boldsymbol{e}_i\left(\boldsymbol{P}^{d_{\xi_\omega}}_{\xi_\omega}\right)^T \tag{2.47}$$

と表せる．健全度分布$\boldsymbol{\mu}^{d_{\xi_\omega}}_{\xi_\omega}(T)$の各要素を$\mu^{d_{\xi_\omega}}_{i,\xi_\omega}(T)$ $(i=1,\cdots,K-1)$と表記する．さらに，橋梁システム全体を構成する橋梁のうちω番目の橋梁に対して採用される補修政策ベクトルを$\boldsymbol{d}_\omega=(d_1,\cdots,d_{\Xi(\omega)})$と定義しよう．この時，補修政策ベクトル$\boldsymbol{d}_\omega$の下で実現する構成部材全体の健全度の確率分布は，

$$\boldsymbol{\mu}^{\boldsymbol{d}_\omega}(T)=\{\boldsymbol{\mu}^{d_1}_1(T),\cdots,\boldsymbol{\mu}^{d_{\Xi(\omega)}}_{\Xi(\omega)}(T)\} \tag{2.48}$$

で表現される．さらに，橋梁システム全体の健全度確率分布$\boldsymbol{\Upsilon}^{\boldsymbol{d}}(T)$は式（2.48）を用いて

$$\boldsymbol{\Upsilon}^{\boldsymbol{d}}(T)=\{\boldsymbol{\mu}^{\boldsymbol{d}_1},\cdots,\boldsymbol{\mu}^{\boldsymbol{d}_\Omega}\quad\} \tag{2.49}$$

マルコフ連鎖モデル(2.47)を反復的に利用することにより，各期における橋梁システム全体の健全度分布(2.49)を求めることが可能となる．

橋梁ωを構成する橋梁部材の初期健全度$\boldsymbol{\gamma}_\omega(0)=\{\gamma_1(0),\cdots,\gamma_{\Xi(\omega)}(0)\}$を与件としよう．さらに，補修政策$d_{\xi_\omega}$とその下での推移確率$\boldsymbol{P}^{d_{\xi_\omega}}_{\xi_\omega}$が与えられれば，時点$t=T$における部材$\xi_\omega$の健全度分布$\boldsymbol{\mu}^{d_{\xi_\omega}}_{\xi_\omega}(T)$は，マルコフ推移確率$\boldsymbol{P}^{d_{\xi_\omega}}_{\xi_\omega}$を用いて式(2.47)で表現できる．この時，橋梁$\omega$の健全度分布は式(2.48)で表現できる．

さらに，式（**??**）から定義できる，ある橋梁部材ξ_ωの 1 期あたりの期待補修費$e^{d_{\xi_\omega}}_i$を成分とする列ベクトル$\boldsymbol{e}^{d_{\xi_\omega}}=(e^{d_{\xi_\omega}}_1,\cdots,e^{d_{\xi_\omega}}_{K-1})'$を用いると，時点$t=T$から時点$t=T+1$の期間に発生する部材の期待補修費$Er^{d_{\xi_\omega}}_{\xi_\omega}(T)$は，

$$Er^{d_{\xi_\omega}}_{\xi_\omega}(T)=\boldsymbol{\mu}^{d_{\xi_\omega}}_{\xi_\omega}(T-1)\boldsymbol{e}_{\xi_\omega} \tag{2.50}$$

と表せる．各部材の期待補修費を加算し，橋梁ωの期待補修費の期待値$Er^{\boldsymbol{d}_{\xi_\omega}}(T)$を，

$$Er^{\boldsymbol{d}_\omega}(T)=\sum_{l=1}^{\Xi(\omega)}Er^{d_l}_l(T)+\kappa_\omega \tag{2.51}$$

と表す. ここでκ_ωは橋梁ωを補修する際に必要な固定費用である. さらに橋梁システム全体の期待補修費の期待値$Er^{\boldsymbol{d}}$は，式（2.51）を用いて，

$$Er^{\boldsymbol{d}}(T) = \sum_{l=1}^{\Omega} Er^{\boldsymbol{d}_l}(T) \tag{2.52}$$

と表すことができる. なお，予算制約が存在しない場合は，上記の手順で橋梁システム全体の劣化・補修過程をシミュレートすることができる. しかし，予算制約が存在する場合には，補修の優先順位を決定することが必要となるため，上記の方法を適用することができない. この場合，モンテカルロ法により劣化・補修過程(2.47)のサンプルパスを発生させ，健全度分布$\boldsymbol{\Upsilon}^{\boldsymbol{d}}(T)$, 期待補修費$Er^{\boldsymbol{d}}(T)$を求めることが必要となる. 後に紹介するBMSアプリケーションのシミュレーションモジュールでは，モンテカルロ法を用いたシミュレーションを用いている.

2.5.2 制約条件下のシミュレーション

各期の補修費用に制約がない場合には，ライフサイクル評価によって導出された最適補修政策に基づいた補修が確実に実施される. しかし，現実の橋梁管理においては，最適補修政策を遂行するための予算を毎年確保できるとは限らず, 様々な制約条件の下で，優先的に補修すべき箇所を選定して補修が実施される. 本システムでは，１）予算制約，２）状態制約，という２つの制約条件を考える. 予算制約とは，管理者が橋梁システム全体を管理するための維持補修費に制約が掛けられている場合である. 一方，状態制約は，管理者が一期毎に橋梁システム全体をある一定水準以上の健全度に保つことを課せられていることを想定している. 本システムでは，

$$\rho = \frac{\sum_{l=1}^{\Omega}\sum_{i=1}^{K}\mu_{i,l}^{d_l}}{R} \tag{2.53}$$

で表される橋梁システム全体を構成する部材の健全度の単純平均ρを状態制約の指標とした. ただし，式（2.53）で$\mu_{i,l}^{d_l}$に注意したい. 制約条件下の基では，毎期の補修が適切に行われないため，健全度Kが観測されることもありうるので，μの定義を健全度Kまで拡張している. 同様にして，制約条件下のシミュレーション実験を実行するための推移確率行列と期待補修費について，便宜的にその定義を拡張しよう. ある部材ξ_ωの補修を考慮した推移確率行列は式（2.32）を用いて，

$$\tilde{\boldsymbol{P}}^{d_{\xi_\omega}} = \begin{pmatrix} p_{11}^{d_{\xi_\omega}} & \cdots & \cdots & p_{1K-1}^{d_{\xi_\omega}} & 0 \\ \vdots & \ddots & & \vdots & 0 \\ \vdots & & \ddots & \vdots & 0 \\ p_{K-11}^{d_{\xi_\omega}} & \cdots & \cdots & p_{K-1K-1}^{d_{\xi_\omega}} & 0 \\ 1 & \cdots & \cdots & 0 & 0 \end{pmatrix} \tag{2.54}$$

と定義し，健全度Kの期待補修費用は式（**??**）により，

$$e_K^{d_{\xi\omega}} = c_K^{d_{\xi\omega}} \tag{2.55}$$

と定義しよう．これは，健全度Kの部材に関しては補修を実施するという戦略が確定的に採られることを示している．

シミュレーション実験では毎期末に劣化シミュレーション実験の結果から，橋梁システム全体を構成する橋梁からどの橋梁に対して優先的に補修を施すかを決定し，補修シミュレーション実験を行う必要がある．本システムではその優先順位決定モデルとして橋梁毎に算出される，次の３つのいずれかの指標によって決定される．その指標とはすなわち，指標１）劣化シミュレーションの実施後，次期の直前における橋梁構成部材の健全度の単純平均値，指標２）補修費用を橋面積で除した値，指標３）シミュレーション時点$t = T$における健全度Kの部材数を構成部材数で除した値，の３つであり，次にその計算方法を示す．

指標１）劣化シミュレーションの実施後，時点$t = T+1$の直前$t = T'$において，ある橋梁ωを構成する部材の健全度の単純平均値$\epsilon_\omega^1(T')$は，式（2.48）を用い，

$$\epsilon_\omega^1(T') = \frac{\sum_{l=1}^{\Xi(\omega)} \boldsymbol{\mu}_l^{d_l}(T')}{\Xi(\omega)} \tag{2.56}$$

となる．

指標２）式（2.51）を用いて，ある橋梁ωの補修費用を橋面積ι_ωで除した値を$\epsilon_\omega^2(T)$とすると，

$$\epsilon_\omega^2(T) = \frac{Er\boldsymbol{d}_\omega(T)}{\iota_\omega} \tag{2.57}$$

となる．

指標３）ある時点$t = T$において，ある橋梁ωを構成する部材の健全度がKであるものを全橋梁部材数で除した値を$\epsilon_{\omega(T)}^3$とすると，式（2.48）とその定義を用いて，

$$\epsilon_\omega^3(T) = \frac{\sum_{l=1}^{\Omega} \mu_{K,l}^{d_l}}{\Xi(\omega)} \tag{2.58}$$

となる．

本項の議論をまとめると，本システムで制約条件下の劣化・補修シミュレーションは次の要領で実施される．

（ステップ１）初期時点$t = 0$で，橋梁システム全体の初期分布$\boldsymbol{\Gamma}(0)$を与える．

（ステップ２）時点$t = T$の健全度分布を基に橋梁システム全体を構成する全橋梁部材に対し，劣化過程のサンプルパスをモンテカルロ法により発生させ，劣化過程をシミュレートする（劣化シミュレーション）．

（ステップ３）時点$t=T+1$の直前$t=T'$において，指標１～指標３のいずれかを優先順位決定指標指標として算出し，補修の優先順位を決定する．そして，優先度の高い橋梁から漸次補修を行い，補修費用を加算する（補修シミュレーション）．

（ステップ４）予算制約を設定した場合には，加算した補修費用が当該期の予算制約を超えない範囲で補修を実施する．状態制約を設定した場合には，橋梁を補修するたびに，橋梁全体の平均健全度ρを式 (2.53) により算出する．予算を全て費消したとき，あるいは平均健全度条件をクリアした時に，時点$t=T+1$が予め設定した計算期間であれば，試行を終了する．設定した期間内であれば，補修を行った後の健全度分布を状態を時点$t=T+1$の健全度分布として，（ステップ２）を行う．

さらに設定した回数のモンテカルロ法によるサンプルパスを発生させ，時点$t=T$における橋梁システム全体の期待健全度分布$\boldsymbol{\Upsilon}(T)$と，期待補修費用$Er^{\boldsymbol{d}_\omega}(T)$を算出し，さらには，期待健全度分布$\boldsymbol{\Upsilon}(T)$から，シミュレーション試行期間にわたる会計情報をシミュレートする（次節参照）．

ただし，本項で提案した優先順位決定モデルは，本システムにおいて戦略レベルにおける劣化・補修過程のシミュレーションモジュールに適用されるモデルであることを断っておく．次節で述べる戦術レベルにおける補修の優先順位の決定には路線の重要性や管理瑕疵に関するリスク，さらには橋梁管理者の定性的戦略など様々な要因を総合的に勘案して決定される．複数の制約条件，優先順位決定モデルが本システムに装備されているのは，本項で紹介するシミュレーションによって，管理者が橋梁システム全体の長期的な維持管理方針を柔軟に決定することを支援しようとする意図に拠るものである．

2.6 数学的事項

2.6.1 マルコフ推移確率p_{ij}の算出

2つの検査時点の間に健全度がiからj $(j \geq i+2)$まで2つ以上変化する場合をとりあげよう．健全度jの状態が継続する期間長の分布を表す確率密度関数を$f_j(y_j)$，分布関数を$F_j(y_j)$と表そう．健全度jの状態に関するハザード関数を$\lambda_j(y_j) = \theta_j$と表す．期間$[y_A, y_B)$の間に，健全度が$i$から$j$に移行する事象が生起するためには，1）時点$y_A$から時点$\bar{s}_i = y_A + \bar{z}_i \in [y_A, y_B)$まで健全度が$i$のまま推移する．2）時点$\bar{s}_i = y_A + \bar{z}_i$において健全度が$i$から$i+1$に推移する．3）時点$\bar{s}_i = y_A + \bar{z}_i$から時点$\bar{s}_{i+1} = \bar{s}_i + \bar{z}_{i+1}$ $(< y_B)$まで，健全度$i+1$が継続し，時点$\bar{s}_{i+1}$において健全度が$i+2$に推移する．同様のプロセスを経たのちに，4）時点$\bar{s}_{j-1}$ $(< y_B)$に健全度がjに推移し，時点y_Bまで健全度jが継続するという事象が同時に生起しなければならない．以上の事象が同時に生起する条件付き確率密度$q_j(\bar{z}_i, \bar{z}_{i+1}, \cdots, \bar{z}_{j-1} | \zeta_i \geq y_A)$は

$$
\begin{aligned}
& q_j(\bar{z}_i, \bar{z}_{i+1}, \cdots, \bar{z}_{j-1} | \zeta_i \geq y_A) \\
&= g_i(\bar{z}_i | \zeta_i \geq y_A) \prod_{m=i+1}^{j-1} f_m(\bar{z}_m) \tilde{F}_j \left(Z - \sum_{m=i}^{j-1} \bar{z}_m \right) \\
&= \prod_{m=i}^{j-1} \theta_m \cdot \exp\left\{ - \sum_{m=i}^{j-1} \theta_m \bar{z}_m - \theta_j (Z - \sum_{m=i}^{j-1} \bar{z}_m) \right\} \\
&= \prod_{m=i}^{j-1} \theta_m \cdot \exp\left\{ -\theta_j Z - \sum_{m=i}^{j-1} (\theta_m - \theta_j) \bar{z}_m \right\}
\end{aligned}
\tag{2.59}
$$

と表せる．以上の議論では，$\bar{z}_i, \cdots, \bar{z}_{j-1}$を固定していた．しかし，健全度$i$ $(i = 1, \cdots, J-1)$の寿命ζ_iは確率変数であり，$z_i \geq 0, \cdots, z_{j-1} \geq 0$ $(j \leq J)$は

$$
0 \leq z_i + z_{i+1} + \cdots + z_{j-1} \leq Z \tag{2.60}
$$

を満足する範囲の中で自由な値をとる．したがって，検査時点y_Aとy_Bの間で健全度がiからj $(j \geq i+2)$に推移するマルコフ推移確率p_{ij}は若干の計算により

$$
\begin{aligned}
\pi_{ij} &= \mathrm{Prob}[h(y_B) = j | h(y_A) = i] \\
&= \int_0^Z \int_0^{Z - z_i} \cdots \int_0^{Z - \sum_{m=i}^{j-2} z_m} \\
&\quad q_j(z_i, \cdots, z_{j-1} | \zeta_i \geq y_A) dz_i \cdots dz_{j-1} \\
&= \sum_{k=i}^{j} \prod_{m=i}^{k-1} \frac{\theta_m}{\theta_m - \theta_k} \prod_{m=k}^{j-1} \frac{\theta_m}{\theta_{m+1} - \theta_k} \exp(-\theta_k Z)
\end{aligned}
\tag{2.61}
$$

と導出できる．

2.6.2 完全エルゴード性

初期の健全度がiの状態から，推移確率行列$\tilde{\boldsymbol{P}}^{\boldsymbol{d}}$により$n$回推移した後に健全度$j$に到達する確率$\pi_{ij}^{d}(n)$を

$$\pi_{ij}^{d}(n) = \sum_{k=1}^{K-1} \pi_{ik}^{d}(n-1) p_{kj}^{d} \tag{2.62}$$

と表そう．さらに，極限$n \to \infty$における推移確率π_{ij}^{d}を$\pi_{ij}^{d}(n)$を用いて

$$\pi_{ij}^{d} = \lim_{n \to \infty} \pi_{ij}^{d}(n) \tag{2.63}$$

と表そう．この時，任意の健全度j $(j = 1, \cdots, K-1)$に対して

$$\pi_{1j}^{d} = \pi_{2j}^{d} = \cdots = \pi_{K-1j}^{d} \tag{2.64}$$

を満足する場合，p_{ij}^{d}を(i,j)要素に持つ推移確率行列$\tilde{\boldsymbol{P}}^{\boldsymbol{d}}$が完全エルゴード性を満足すると定義する．条件(2.64)は，定常状態において状態jに達成する確率π_{ij}^{d}が初期状態iに依存しないことを示している．たとえば，推移確率行列$\tilde{\boldsymbol{P}}^{\boldsymbol{d}}$の$(i,j)$要素$p_{ij}^{d}$ $(i \leq j)$がすべて$p_{ij}^{d} > 0$の場合には完全エルゴード条件を満足する．通常の橋梁アセットマネジメントにおいて，健全度の推移確率行列は完全エルゴード性を満足すると考えることができる．次で説明するように，完全エルゴード性は橋梁のライフサイクル費用評価が唯一に決定されるための必要十分条件である．

2.6.3 期待累積ライフサイクル費用$u_i^d(n)$の構造

期待累積ライフサイクル費用$u_i^d(n)$は，補修戦略$d \in D$の下で，時点$t = 0$において初期健全度iの状態から時点$t = n$に至るまでの各期に発生するライフサイクル費用の総和に関する期待値を表している．時点$t = 0$から時点$t = 1$へ 1 期経過する間に劣化が進展し，時点$t = 1$の直前に行われた目視検査により健全度がjに推移したと判定されたとしよう．その結果，時点$t = 1$の直前に補修アクションが実施される．時点$t = 0$において時点$t = 1$にどのような補修が実施されるかは不確実である．そこで，$t = 0$において，健全度がiである場合，時点$t = 1$の直前までに補修戦略dの下で必要となる期待補修費用e_i^dを

$$e_i^d = \sum_{j=i+1}^{K} p_{ij}^{+} c_j^d \ (i = 1, \cdots, K-1) \tag{2.65}$$

と定義しよう．つぎに，初期時点から 1 期だけ時間が進んだつぎの時点$t = 1$に着目しよう．時点$t = 0$から時点$t = 1$へ 1 期経過する間に劣化が進展し，時点$t = 1$の直前に実施された補修アクションを経て，時点$t = 1$に健全度がjに推移したと考えよう．さらに，時点$t = 1$から補修戦略dを適用し，時点$t = n$に至るまでの$n-1$期間中に発生する期待累積ライフサイ

クル費用を$u_j^d(n-1)$と表そう．時点$t=0$から時点$t=1$までの間に，補修戦略$d \in D$の下で，健全度が$h(0)=i$から$h(1)=j$に推移する確率をp_{ij}^dと表せば，期待累積ライフサイクル費用$u_i^d(n)$と$u_j^d(n-1)$の間に

$$u_i^d(n) = e_i^d + \sum_{j=1}^{K-1} p_{ij}^d u_j^d(n-1) \quad (i=1,\cdots,K-1) \tag{2.66}$$

が成立する．マネジメント期間の最終時点nの期待累積ライフサイクル費用$u_i^d(0)$は$u_i^d(0)=0\ (i=1,\cdots,K-1)$と表せる．いま，列ベクトル$\boldsymbol{u}^d(n)=(u_1^d(n),\cdots,u_{K-1}^d(n))'$, $\boldsymbol{e}^d=(e_1^d,\cdots,e_{K-1}^d)'$を定義すれば，式(2.66)は

$$\boldsymbol{u}^d(n) = \boldsymbol{e}^d + \tilde{\boldsymbol{P}}^d \boldsymbol{u}^d(n-1) \tag{2.67}$$

と表すことができる．ただし，$\boldsymbol{u}^d(0)=\mathbf{o}$である．再帰方程式(2.67)の解$\boldsymbol{u}^d(n)$を求めよう．いま，行列$\overline{\boldsymbol{P}}^d$を

$$\overline{\boldsymbol{P}}^d = \lim_{n\to\infty} \frac{1}{n} \sum_{t=0}^{n} \tilde{\boldsymbol{P}}^d(t) \tag{2.68}$$

と定義しよう．ただし，$\tilde{\boldsymbol{P}}^d(t)=\{\tilde{\boldsymbol{P}}^d\}^t$である．また，列ベクトル$\boldsymbol{v}^d=(v_1^d,\cdots,v_{K-1}^d)'$を

$$\boldsymbol{v}^d = \sum_{t=0}^{\infty} \left\{ \tilde{\boldsymbol{P}}^d(t) - \overline{\boldsymbol{P}}^d \right\} \boldsymbol{e}^d \tag{2.69}$$

と定義しよう．右辺は収束し有界である．ここで，

$$\boldsymbol{q}^d = \overline{\boldsymbol{P}}^d \boldsymbol{e}^d \tag{2.70}$$

と表そう．この時，列ベクトル$\boldsymbol{v}^d$は

$$\begin{aligned} \boldsymbol{v}^d = & \sum_{t=1}^{n} \tilde{\boldsymbol{P}}^d(t)\boldsymbol{e}^d - n\boldsymbol{q}^d \\ & + \sum_{t=n+1}^{\infty} \left\{ \tilde{\boldsymbol{P}}^d(t) - \overline{\boldsymbol{P}}^d \right\} \boldsymbol{e}^d \end{aligned} \tag{2.71}$$

と分解できる．ここで，$\overline{\boldsymbol{P}}^d$の$(i,j)$要素$\overline{p}_{ij}^d$は$(K-1\times K-1)$次元行列$\tilde{\boldsymbol{P}}^d(n)$の$(i,j)$要素$\tilde{p}_{ij}^d(n)$を用いて

$$\overline{p}_{ij}^d = \lim_{n\to\infty} \frac{1}{n} \sum_{t=0}^{n} \tilde{p}_{ij}^d(n) \tag{2.72}$$

と表せる．ここに，$\sum_{t=0}^{n} \tilde{p}_{ij}^d(n)$は初期時点から時点$n$までに初期状態$i$から出発して状態$j$を訪れる回数の期待値である．したがって，マルコフ推移確率行列$\tilde{\boldsymbol{P}}^d$が完全エルゴード性を

満足するとき，$\overline{p}_{ij}^d$は長期定常状態において

$$\hat{pi}_j^d = \sum_k \hat{\pi}_k^d p_{jk}^d (j = 1, \cdots, K-2) \tag{2.73a}$$

$$\sum_{j=1}^{K-1} \hat{p}_j = 1 \tag{2.73b}$$

を満足する定常状態確率π_j^dに他ならない．したがって，マルコフ推移確率行列$\tilde{\boldsymbol{P}}^{\boldsymbol{d}}$が完全エルゴード性を満足するとき，

$$\overline{\boldsymbol{P}}^d = \begin{pmatrix} \pi_1^d & \cdots & \cdots & \pi_{K-1}^d \\ \vdots & \ddots & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ \pi_1^d & \cdots & \cdots & \pi_{K-1}^d \end{pmatrix} \tag{2.74}$$

が成立する．したがって，

$$\begin{aligned} \boldsymbol{q}^d &= \overline{\boldsymbol{P}}^d \boldsymbol{e}^d \\ &= \left(\sum_{i=1}^{K-1} \pi_i^d e_i^d, \cdots, \sum_{i=1}^{K-1} \pi_i^d e_i^d \right) \\ &= (q^d, \cdots, q^d)' \end{aligned} \tag{2.75}$$

を得る．すなわち，$q^d = \sum_{i=1}^{K-1} \pi_i^d e_i^d$は定常状態において生じる 1 期あたりの期待補修費用（平均費用）を表す．式(2.75)で定義される平均費用は初期状態に依存しない．したがって，マネジメント期間nにおける期待累積ライフサイクル費用$\boldsymbol{u}^d(n)$は

$$\boldsymbol{u}^d(n) = \sum_{t=1}^{n} \tilde{\boldsymbol{P}}^d(t) \boldsymbol{e}^d \tag{2.76}$$

と表される．この時，式(2.71)，(2.76)より

$$\boldsymbol{u}^d(n) = nq^d + \boldsymbol{v}^d + O(n) \tag{2.77}$$

を得る．ただし，

$$O(n) = \sum_{t=n+1}^{\infty} \left\{ \tilde{\boldsymbol{P}}^d(t) - \overline{\boldsymbol{P}}^d \right\} \boldsymbol{e}^d \tag{2.78}$$

であり，式(2.72)より$\lim_{n\to\infty} O(n) = 0$が成立する．したがって，十分大きな$n$に対して，期待累積ライフサイクル費用$u_i^d(n)$を

$$u_i^d(n) = nq^d + v_i^d \ (i = 1, \cdots, K-1) \tag{2.79}$$

と近似できる．すなわち，期待累積ライフサイクル費用$u_i^d(n)$は期間長nに比例する項と初期健全度iに依存する項に分解することができる．橋梁を半永久的に供用する場合，マネジメント期間長nは無限大であり，式(2.79)が常に近似的に成立する．

3　資産会計システムの開発に関する検討

今後，財政基盤の縮小が予想される中で，新規投資の余力を残しながら既存の社会資本に対して効率的な補修を実施するための予算管理が重要となってくる．企業会計においては，売上や利益など目標値の設定とその達成度合いを会計的に測定し，その業績評価・管理と企業行動をコントロールするための管理会計システムが発展してきた．社会資本のマネジメントにおいても，施設の機能を維持するために十分な補修が継続的に実施されているかを評価し，適切なサービス水準を持続的に維持するための予算を自律的に調達するための管理会計システムを構築することが極めて重要である．

3.1　管理会計情報の目的

橋梁マネジメントにあたっては，橋梁のライフサイクルに対応した費用の発生を予算管理情報として記述できるインフラ会計を整備することが望ましい．橋梁マネジメントのための管理会計情報の目的は多様であるが，主なものとして以下の２つがあげられる．第１に，橋梁の劣化過程は非常にゆっくりとしたものであり，補修予算を毎期厳密に一定にしなければならないというものでもない．橋梁の補修予算の年次的変動は避けられない．しかし，短期的変動はあるにせよ，長期的には平均して一定の補修費用が支出されなければならない．インフラ会計の１つの目的は，橋梁システム全体をマネジメントするために必要となる各会計年度の平均的な予算規模を求めるとともに，必要な補修費用が経年的に費消されているかどうかを検討できるようなモニタリング情報を提供することにある．第２に，過去に建設された橋梁の中には，適切な予防補修が施されずに，劣化が進展している橋梁が少なからず存在する．このように過去の時点において積み残した補修需要に関しては，近い将来に解消することが必要である．そのためには，橋梁補修の超過需要を解消し，定常的な補修・劣化過程を実現するためのマネジメント計画を作成することが必要である．そこで，インフラ会計の第２の目的は，過去の時点において積み残された補修需要規模を求めるとともに，このような補修需要が計画通り解消されているかを検討できるモニタリング情報を提供する点にある．

3.2 橋梁の資産評価と会計方式

橋梁の資産管理を行うための会計方式として，更新会計，繰延維持補修会計，減価償却会計の３種類があるが，本節では，橋梁の管理会計としては繰延維持補修会計が望ましいことを指摘する．

3.2.1 管理会計情報

地方自治体の会計方式は地方自治法の定めにより現金主義を採用しており，会計処理において現金の収入と支出というフローの情報が管理される．しかし，近年では発生主義に基づいて会計情報を作成する地方自治体が増加している．発生主義の会計ではフローの情報だけでなくストックに関する情報も管理され，過去に獲得した資産の現時点における状態を評価できる．通常，会計情報は外部報告を目的とする財務会計情報と内部報告を目的とする管理会計情報に大別される．財務会計情報は「公的サービスが効率的な形で行われているか」,「公的サービスは将来的にわたって安定的に提供されるのか」といった点に関する情報を公的サービスの受益者に対し提供すること（すなわち，アカウンタビリティの確保）を目的とする．一方，管理会計情報は公的主体内部での意思決定や業績に関する情報を公的主体内部で共有化し，関連する部局における意思決定を合理化することを目的としている．両者とも情報源は同一であるが，その利用目的によって提供される情報の形態が異なる．

資産会計システムは，単に各会計年度における予算の効率的配分のための情報を提供するのではなく，過去の橋梁新規整備の結果として実現した当該会計年度の橋梁の資産価額を評価し，将来，橋梁の補修計画を合理的に作成するための管理会計情報が必要となる．したがって，橋梁資産の時価評価を通じて橋梁の補修需要を的確に把握することを目的とした発生主義による会計処理が必要となる．

3.2.2 橋梁の資産価額評価

橋梁は，１）社会経済活動の基盤施設を構成する公共財である，２）長期間にわたる使用によりサービス水準が劣化する．サービス水準が低下すれば，補修によりサービス水準を所定のレベルまで回復することが義務づけられた資産である，３）計画から維持管理まで一貫した適切な管理が必要とされる，という特性を持つ．資産会計システムは，橋梁管理者が橋梁施設のサービス水準を一定水準以上に保つための予算管理を目的とするものであり，ライフサイクルに対応した費用の発生を的確に認識･評価をすることが課題となる．橋梁のライフサイクルに応じて多様な費用が発生するが，本報告ではすでに供用された橋梁施設の運営者の立場から，橋梁施設のもたらすサービス機能を所与の水準に保つ

ために必要となる補修費に着目する．ただし，災害等による滅失や機能向上のための道路舗装の改良に関しては考察の対象外とする．

一般に，企業会計における固定資産の貸借対照表計上額はその資産の取得に要した原始取得価額（取得原価）により決定される．貸借対照表では次年度繰越額が算定され，取得原価（または年初貸借対照表価額）との差額が費用として計上される．しかし，１つの資産に対して１つの評価額のみが決定されるわけではない．**表３－１**に示すように，資産評価の方法は，１）資産の取得に要する支出額を基礎として決定するのか，あるいは，保有資産の売却によって得られる収入額を基礎として決定するのか，２）過去の価額を基礎とするのか，現在の価額を基礎とするのか，あるいは，将来の（予想される）価額を基礎として決定するのかに応じてつぎの４つの概念に分類できる．

表３－１　資産評価の考え方

	過去の価額	現在の価額	将来の価額
支出額	取得原価	再調達価額	－
収入額	－	正味実現可能価額	割引現在価値

ａ）取得原価（歴史的原価）

取得時に支払われた現金または現金同等物，あるいは取得するために提供した対価の公正価値をいう．資産を取引した時点での金額を示し，購入者と販売者が実際に合意に達した金額を示す．外部との取引金額であり客観性・検証可能性が非常に高いが，歴史的原価を基礎とするため，物価変動時には貸借対照表計上額が時価を適切に反映しない．

ｂ）再調達価額（取替原価）

保有している資産を測定日（例えば貸借対照表日）で再取得した場合に支払われる現金または現金同等物をいう．実際に取引した金額ではなく，測定日に購入市場で成立している価格を指す．物価変動時には資産価額（時価）を適切に反映する．しかし，橋梁を直接取引する市場が存在しないため，市場価格を資産価額として用いることが非常に困難であり，資産評価の客観性，検証可能性を確保する努力が必要である．

ｃ）割引現在価値

通常の事業活動で期待される将来キャッシュフローの割引現在価値をいう．非営利事業である橋梁管理主体では，事業のキャッシュフローの現在価値を計測できない．営利事業体においても，キャッシュフローに基づいて橋梁のみの資産評価を行うことは不可能である．

ｄ）正味実現可能価額（実現可能価値）

正味実現可能価額とは現時点での通常の売却によって得ることのできる現金または現金同等物（売却収入－売却に係る諸費用）をいう．橋梁事業部門では，橋梁の売却がそもそも想定されていないため，正味実現可能価額の採用は不可能である．

以上の観点を整理すれば，橋梁構造物の資産評価法として取得原価，再調達価額が適切であることが理解できる．いずれの評価方法が望ましいかは，得られた評価結果をどのような目的のために用いるかに依存している．例えば，異なる会計主体間の間で評価結果を比較し，納税者に対して客観的･検証可能な財務会計情報を提供する場合には取得原価が望ましい．しかし，橋梁の補修予算の管理を目的とする資産会計システムは，橋梁管理主体の補修投資能力を適切に評価することを目的としており，橋梁を再調達価額を用いて時価評価することが必要となる．

3.2.3 減価償却に関する問題

固定資産の評価額を，それが利用される各期間にわたって規則的に費用（あるいは行政コスト）として配分するとともに，その額だけ資産の繰越価額を減じていく会計上の手続を「減価償却」という．減価償却を行うにあたっては，１）固定資産の当初取得時の評価額，２）耐用年数，３）残存価額の３つの要素が必要となる．このうち，１）については，企業会計上では取得価額を基礎とするが，橋梁の資産会計システムでは再調達価額を用いるべきであろう．耐用年数は，当該固定資産の使用可能期間である．本来，各固定資産に対して個別に耐用年数を見積もることが必要であるが，企業会計上は税法上の要請により，税法の基準を採用している企業が多い．残存価額は，固定資産の耐用年数到来時において予想される当該資産の資産価額であるが，企業会計では税法上の要請から取得原価の10％と設定する場合が多い．結果的には，減価償却の手続は固定資産の当初取得時の評価額から残存価額を差引いた額を耐用年数の期間で規則的に配分し，各年度の費用とするものである．

減価償却は，費用配分の原則に基づき，適正な期間費用の計算のために行われる手続である．減価償却によって得られる資産の次年度繰越額（年度末貸借対照表計上額）は，必ずしも当該資産の資産価値を表すものではなく，翌年度以降に費用として処理されるべき金額を意味する．実際，企業会計では客観性･検証可能性の確保及び適正な期間損益計算が重視されるため，取得原価を基礎とし，減価償却の手続により次期繰越額（期末貸借対照表計上額）が決定される．次年度繰越額（年度末貸借対照表計上額）は,「翌年度以降の収益に対応すべく翌年度以降に費用となるべき金額」であり，貸借対照表日時点での当該資産の売却価値や再調達価額を表すものではない．規則性が要求される理由は，恣意性の排除にある．

インフラ資産が減価償却資産に該当するか否かに関して会計学上の論争が続いており決着がついていない．橋梁に関しても同様の議論が成立する．橋梁が減価償却資産に該当しないという立場に立てば以下の議論が成立する．橋梁を適切に維持・補修すれば，橋梁は常に良好で安全な状態に維持され無限の耐用年数を持ちうる．したがって，価値の減少は発生しない．橋梁のサービス水準を保つために必要な維持補修支出額が支出される．実際に支出した維持補修支出額が所与の橋梁施設のサービス水準を維持するために必要な繰入額よりも少ない場合は，繰延引当金が計上される．一方，減価償却が必要であるという議論も存在する．橋梁は適切な維持・補修によって使用可能年数が延びるにしても，補修をしない限り反復的な使用や時間経過とともに減価しており，当初の資産価額についての減価償却が必要となる．また，資産の維持・サービス提供能力の確保・運用成果を評価するためにはコスト情報が必要であり，そのために費用として減価償却すべきであると主張する．このように橋梁の資産評価において減価償却を考慮すべきかどうかに関して見解が対立している．

減価償却の取り扱いの方法に応じて，異なる管理会計システムを設計することができる．

表３－２　会計方式

	減価償却	会計方式
a	不適用	更新会計
b	不適用	繰延維持補修会計
c	適用	減価償却会計

表３－２に示すように，橋梁を減価償却資産と考えれば減価償却会計，非減価償却性資産と考えれば更新会計，あるいは繰延維持補修会計が適用できる．いずれの方法が望ましいかは，管理会計システムの目的に依存する．しかし，資産会計システムの目的は橋梁管理者が橋梁の現状のサービス水準を適切に判断し，補修予算獲得のための基礎情報を獲得することにある．したがって，減価償却を実施する場合でも，橋梁施設のサービス水準の減少を的確に反映したものでなければならない．減価償却を用いて資産評価を行うためには，橋梁の耐用年数を適切に設定する必要がある．なお，橋梁の年初貸借対照表価額と年度末価額の差を資産価額の減少とみなし，費用として計上するという考え方もある．この過程は資産再評価であり減価償却の手続ではない．また，橋梁の質的水準を向上するための費用は補修費ではなく，資産価額を増加させるための投資である．このような投資により資産価額の変動が生じた場合，橋梁資産の再評価を実施する必要がある．

3.2.4　減価償却と会計方式

橋梁のアセットマネジメントを実施するためには，橋梁のサービス水準を工学的に検査し，あわせて各会計年度において「現実に支出された維持補修支出額」と「工学的に設定

したサービス水準を維持するために必要となる補修費」に基づいて，橋梁のサービス水準が適切に維持されているかどうかを貸借対照表上に明記できるような管理会計システムを構築することが求められる．橋梁の資産評価にあたっては，減価償却に対する考え方の違いにより，a) 更新会計，b) 繰延維持補修会計，c) 減価償却会計という３つの異なった会計方式を定義できる．各会計方式の様式を**図３－１**，**図３－２**，**図３－３**に示している．これらの図は，フローとストックのバランスを表現するために，会計諸表における貸借対照表と損益計算書を統合した残高試算表を示している．残高試算表は会計年度の期末で決算のために作成される．なお，同図では橋梁管理会計と関連する部分のみ記述しており，それ以外の会計情報を省略している．

a）更新会計

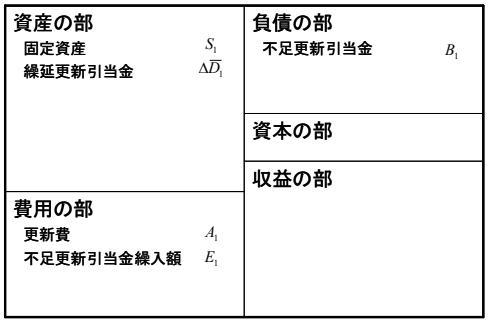


図３－１　更新会計の残高試算表

更新会計では資産利用に関わる費用が更新に費やされた金額で決定される．更新会計では，橋梁に必要な維持補修が常に行われ，新規取得時のサービス水準が常に維持されると仮定し，資産の減価償却を行わない．すなわち，橋梁の資産価額S_1は初期投資時の取得原価（あるいは再調達価額）に一致する．その上で，橋梁施設のサービス水準を維持するために必要となる各年度の更新費A_1を工学的に推定する．会計年度内に橋梁の更新費C_1が支出されたとしよう．いま，更新費C_1が本来ありうべき更新費A_1より過小であれば，その差額$A_1 - C_1$が資産のマイナスとして計上されている繰延更新引当金ΔD_1に組み入れられる．ただし，橋梁補修の積み残しが多くなり，橋梁が極端に劣化すると，積み立てた引当金の範囲で更新できない場合も起こりうる．この場合には，追加的に必要となる更新費の累計額を，繰延更新引当金とは別に繰延不足更新引当金B_1として計上することが必要となる．更新会計では，橋梁は常に新規取得時の水準が保たれるという前提に立つが，現実には，供用を通じて橋梁施設のサービス水準は劣化し，新規取得時のサービス水準を維持できるわけではない．更新会計では橋梁の現実の資産価額に関する会計情報が貸借対照表上に現れない．過

去に支出すべきであった更新費の繰延額に関する会計情報のみが現れることになる．そのため，更新会計では会計年度における道路舗装の資産価額に関する会計情報を提供できない．

b）繰延維持補修会計

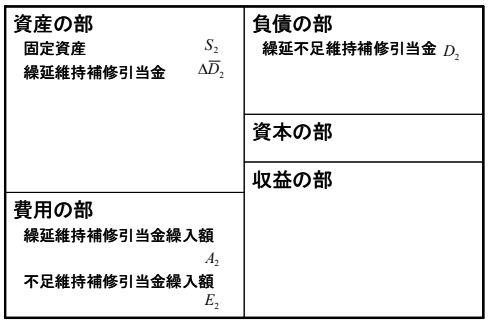


図３－２　繰延維持補修会計の残高試算表

繰延維持補修会計では資産利用に関わる費用が，当該資産システムを維持するのに費やされるべき見積額によって決定される．繰延維持補修会計では，長期的な資産管理計画に基いて維持補修費総額を算出するとともに，その費用総額を各年度に割り振る．管理対象の橋梁全体にわたって，工学的検討により適切な補修時期と補修費を算出することにより，各年度における維持補修引当金繰入額A_2を費用の部に繰入れる．一方，当該期の実際の維持補修支出額C_2が確定したとしよう．仮に，$A_2-C_2>0$であれば，その残高を負債として認識し，繰延維持補修引当金D_2に繰入れる（あるいは，負の繰延維持補修引当金ΔD_2として資産の部に繰り入れる）．すなわち，前期の期末の繰延維持補修引当金を$\bar{D}_2$とすれば，今期の期末の繰延維持補修引当金は$D_2=\bar{D}_2-C_2+A_2$と計上される．逆に，今期支出された維持補修支出額費が維持補修引当金繰入額を超過している$(C_2-A_2>0$が成立する$)$場合，前期の負債の部の繰延維持補修引当金$\bar{D}_2$をC_2-A_2だけ取り崩す．なお，ある橋梁部材の補修を繰延べたことにより，当該部材の損傷度が低下し，再調達価額を算定する際に想定した最適工法より，大規模補修が必要になった場合を考えよう．この時，大規模補修のために必要となる補修費と最適工法による補修費の差額を追加維持補修費として定義する．さらに，当該年度に発生した追加維持補修費相当額を不足維持補修引当金繰入額E_2として費用の部に繰り入れる．その上で，当該年度に，大規模補修のために追加維持補修支出F_2が支出されればE_2-F_2を繰延不足維持補修引当金B_2に繰り入れる．すなわち，前年度期末の繰延不足維持補修引当金を$\bar{B}_2$とすれば，今期末の繰延不足維持補修引当金は$B_2=\bar{B}_2+E_2-F_2$となる．橋梁の資産価額S_2は取得原価，あるいは再調達価額で評価される．繰延維持補修会計では，橋梁部材の劣化による資産価額の減少分が繰延維持補修引当金，及び繰延不足維持補修引当金と

して管理会計上に現れ，各会計年度における橋梁の資産水準を評価することが可能となる．

c）減価償却会計

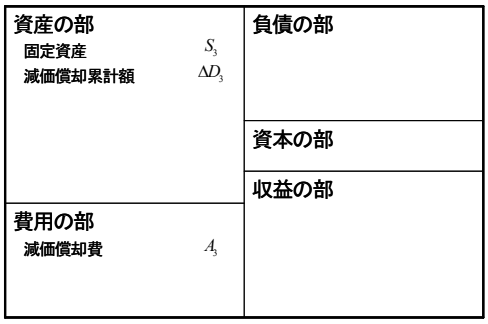


図３－３　減価償却会計の残高試算表

減価償却会計は資産利用に関わる費用が支出されたサービス提供能力の見積もりによって決定される．減価償却会計では，各会計年度における資産価額S_3の減価相当額を減価償却費A_3として認識し，その累計額を負の資産ΔD_3として資産の部に計上する．減価償却を行うために，資産価額を橋梁の耐用年数にわたって一定のルールに基づいて費用配分する．毎期費用として計上されている減価償却費は，当該期に実際に支出されているわけではない．実際に支出されていない費用を会計諸表のなかで費用として認識するため，減価償却費の累計額は将来の補修に対する引当金と解釈することができる．しかし，税制上の耐用年数を用いて減価償却費を計算した時,「減価償却費累計額」が「補修のために必要となる費用」に一致する保証はない．この場合，毎年の維持補修費と取得原価に対する減価償却費とを直接比較しても，維持補修費の適正度に関する適切な情報を得ることはできない．資産の劣化に関する財務会計上のアカウンタビリティを確保するため，SFFAS No.6では繰延維持補修費を財務諸表に脚注として記載することを規定している．資産会計システムでは橋梁の補修予算管理を行うことが目的であり，毎年発生する減価償却費が，工学的な検討の結果として得られた維持補修費に近似的に一致するように道路舗装の耐用年数を適切に設定することが必要である．しかし，減価償却費累計額に関する情報だけでは，各会計年度にどの程度の維持補修費を支出すべきかが判断できない．減価償却会計を用いて橋梁を資産管理する場合，長期的に維持すべき望ましい橋梁の資産価額を別途定義する必要がある．

工学的検討を踏まえた耐用年数を用いて減価償却費が計上され，会計年度における橋梁の補修資産価額とストック管理水準が（たとえば脚注に）記載されるのであれば，更新会計，繰延維持補修会計，減価償却会計のいずれを用いても必要な管理会計情報を獲得することが可能である．しかし，会計情報の分かり易さという視点に立てば，以上の情報が

会計諸表の中に明示的に記載される繰延維持補修会計がもっとも望ましい.

3.3 平均費用法に基づく橋梁資産会計

平均費用法を用いれば，構造物を非償却性資産として位置づける繰延維持補修会計原則に従った橋梁資産会計を作成することが可能である．

3.3.1 平均費用と相対費用

平均費用法モデルの所で述べたように，時点$t=0$から時点$t=n$までに，アセットマネジメントのために必要となる期待累積ライフサイクル費用は，十分大きなnに対して，近似的に

$$u_i^d(n) = nq^d + v_i^d \ (i = 1, \cdots, K-1) \tag{3.1}$$

と表せる．すなわち，期待累積ライフサイクル費用u_i^dは，n期間内に発生した平均費用nq^dと時点$t=0$における橋梁の健全度に応じた相対費用v_i^dの和で表される．時点tにおいて，橋梁が新規取得時の状態$(h(t)=1)$を維持していれば，平均費用q^dをある目標年次まで積み上げることにより，初期時点から当該年次までに発生する期待累積ライフサイクル費用を求めることができる．しかし，現在時点において橋梁の劣化が進展していれば，今後時間の経過に伴ってより大規模な補修が必要となる可能性がある．そこで，現在時点から目標年次までに発生する期待累積ライフサイクル費用は，当該年次から目標年次までに発生する平均費用を積み上げるとともに，現在時点における健全度iに応じて定義される相対費用$v_i^{d^*}$を加算することが必要となる．当然のことながら，現在時点において橋梁の健全度が新規取得時の水準である$i=1$の場合，期待累積ライフサイクル費用を補正する相対費用は必要でないため$v_1^d=0$と置くことができる．

インフラ会計の第１の目的である各会計年度の平均的な予算規模を決定するために，平均費用$q_i^{d^*}$が重要な情報を提供する．すなわち，橋梁建設時（あるいは部材更新時）以降の各会計年度にわたって，平均費用を毎年積み立てることにより，将来発生する部材の補修費用を調達することが可能となる．橋梁管理者は多くの橋梁を同時に管理しており，各橋梁部材で求めた平均費用を全橋梁部材にわたって集計化することにより，橋梁マネジメントに要する各会計年度における予算総額を求めることができる．

一方，すでに劣化が進展している部材に対しては，毎年平均費用を積み立てるだけでは不十分であり，劣化の進展と対応して相対費用$v_i^{d^*}$を上積みしておく必要がある．インフラ会計の第２の目的を達成するためには，相対費用$v_i^{d^*}$を全橋梁部材に対して集計化することにより，過去の劣化に対して引き当てておくべき予算総額を求めることが必要となる．

3.3.2 管理会計情報と平均費用法

前項で，平均費用法によるライフサイクル費用評価と繰延維持補修会計原則が整合的であることを述べたが，以下ではある橋梁ωの橋梁部材ξ_ωを対象にして，繰延維持補修会計原則に基づく橋梁マネジメントのための管理会計情報作成モデルを具体的に定式化しよう．ある時点$t=T$の橋梁部材ξ_ωの健全度を$\nu_{\xi_\omega}(T)$と時点$t=T+1$の直前T'において補修戦略実施前の健全度を$\nu_{\xi_\omega}(T')$と表す．また，橋梁部材ξ_ωの補修戦略を$d_{\xi_\omega}\in D_{\xi_\omega}$，平均費用を$q_{\xi_\omega}^{d_{\xi_\omega}}$，相対費用を$v_{i,\xi_\omega}^{d_{\xi_\omega}},(i=0,\cdots,K)$，繰延維持補修会計原則に基づく時点$T$の会計情報は本章の議論に則して，固定資産を$S_{\xi_\omega}$，繰延維持補修引当金$\Delta D_{\xi_\omega}$，繰延維持補修引当金繰入額$A_{\xi_\omega}$，不足維持補修引当金繰入額$B_{\xi_\omega}$，繰延不足維持補修引当金$E_{\xi_\omega}$としよう．尚，ここでは後に制約条件下のシミュレーションに対応するために，相対費用$v_{K,\xi_\omega}^{d_{\xi_\omega}}$の定義を式 (2.66) を拡張し，

$$q_{\xi_\omega}^{d_{\xi_\omega}}+v_{K,\xi_\omega}^{d_{\xi_\omega}}=c_{K,\xi_\omega}^{d_{\xi_\omega}}+v_{\chi}^{d_{\xi_\omega}} \tag{3.2}$$

により示されるものとする．ここで，χは式 (2.21) による$\eta^{d_{\xi_\omega}}(K)$である．

２．３．２項で既述したとおり，橋梁の資産評価は再調達価額を用いて行われることが望ましい．ここで橋梁部材ξ_ωの再調達価額U_{ξ_ω}は，橋梁部材が健全度Kとなると直ちに補修が施されるか，あるいは供用が不能となることを部分的マルコフ過程では仮定しているので，健全度Kが観測された時の補修費用$c_{K,\xi_\omega}^{d_{\xi_\omega}}$を用いて，

$$U_{\xi_\omega}=c_{K,\xi_\omega}^{d_{\xi_\omega}} \tag{3.3}$$

と表され，ゆえに固定資産S_{ξ_ω}は

$$S_{\xi_\omega}=U_{\xi_\omega} \tag{3.4}$$

となる．

一方，繰延維持補修引当金繰入額A_{ξ_ω}は，工学的検討により適切な補修時期と補修費を算出し毎年割り振られるという性質を持っているので，平均費用$q_{\xi_\omega}^{d_{\xi_\omega}}$を用いて，

$$A_{\xi_\omega}=q_{\xi_\omega}^{d_{\xi_\omega}} \tag{3.5}$$

となる．ここで，時点$t=T+1$の直前T'において補修戦略実施前の健全度$\nu_{\xi_\omega}(T')$を観測することにより，時点$t=T$の補修費が$c_{\nu_{\xi_\omega},\xi_\omega}^{d_{\xi_\omega}}$が算出される．このとき$c_{\nu_{\xi_\omega},\xi_\omega}^{d_{\xi_\omega}}=0$であれば，すなわちこれは放置施策が採られることを示す．また，補修が実施されれば，補修費$c_{\nu_{\xi_\omega},\xi_\omega}^{d_{\xi_\omega}}$が費消される．一方何らかの制約によって補修費$c_{\nu_{\xi_\omega},\xi_\omega}^{d_{\xi_\omega}}$を費消できなかったとしよう．これは，時点$t=T$に最適工法を採ることができなかったことを示し，時点$t=T+1$以降，追加的に大規模な補修が必要となったことを示す．これは，繰延維持補修会計における不足維

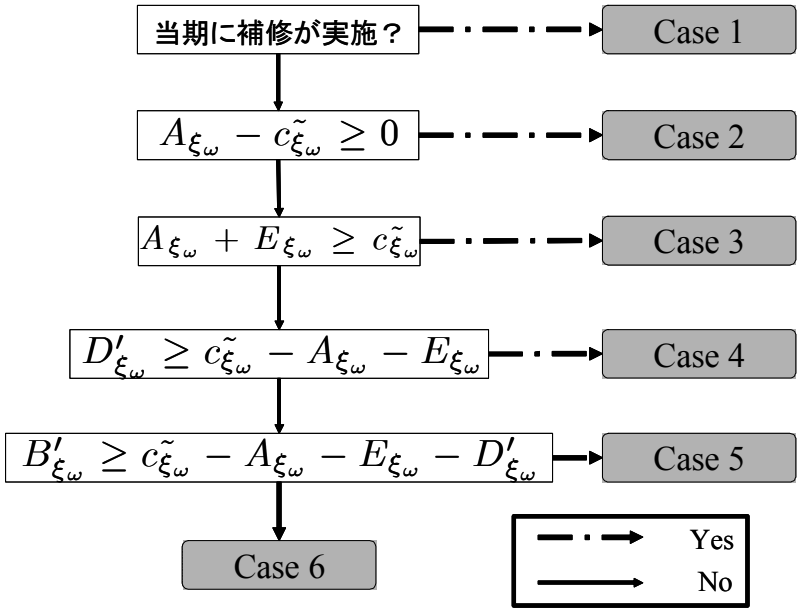


図３－４　引当金算出フロー

持補修引当金を繰入れる必要性が生じたことを意味する．以上を整理すると，**３．５節**の議論に従い不足維持補修引当金繰入額は，

$$E_{\xi_\omega} = \begin{cases} 0 & \text{時点} t = T+1 \text{の直前} T' \text{で補修が実施される時} \\ 0 & c^{d_{\xi_\omega}}_{\nu_{\xi_\omega},\xi_\omega} = 0 \text{の時} \\ v^{d_{\xi_\omega}}_{\nu_{\xi_\omega}(T),\xi_\omega} - v^{d_{\xi_\omega}}_{\chi,\xi_\omega} & \text{上記以外の場合} \end{cases} \tag{3.6}$$

と表すことができる．ただし，式（3.6）のχは式（2.21）による$\eta^{d_{\xi_\omega}}(\nu_{\xi_\omega}(T'))$である．

ここで，時点$t = T+1$の直前T'の繰延維持補修引当金$\Delta\bar{D}_{\xi_\omega}$，繰延不足維持補修引当金$\bar{E}_{\xi_\omega}$とし，実際に費消された費用を$c\tilde{\xi}_\omega$とすると．以上により，維持補修引当金と繰延維持補修引当金も次のフローにより機械的に算出される（**図３－４参照**）．

（Case1）補修が実施されなかった場合

$$D_{\xi_\omega} = \bar{D}_{\xi_\omega} + A_{\xi_\omega}$$
$$B_{\xi_\omega} = \bar{B}_{\xi_\omega} + E_{\xi_\omega}$$

（Case2）$A_{\xi_\omega} - c\tilde{\xi}_\omega \geq 0$

$$D_{\xi_\omega} = \bar{D}_{\xi_\omega} + A_{\xi_\omega} - c\tilde{\xi}_\omega$$
$$B_{\xi_\omega} = \bar{B}_{\xi_\omega} + E_{\xi_\omega}$$

（Case3）$A_{\xi_\omega} - c\tilde{\xi}_\omega < 0$かつ$A_{\xi_\omega} + E_{\xi_\omega} \geq c\tilde{\xi}_\omega$

$$D_{\xi_\omega} = \bar{D}_{\xi_\omega}$$
$$B_{\xi_\omega} = \bar{B}_{\xi_\omega} + E_{\xi_\omega} + A_{\xi_\omega} - c\tilde{\xi}_\omega$$

(Case4) $A_{\xi_\omega} - c\tilde{\xi}_\omega < 0$かつ$A_{\xi_\omega} + E_{\xi_\omega} < c\tilde{\xi}_\omega$かつ$\bar{D_{\xi_\omega}} \geq c\tilde{\xi}_\omega - A_{\xi_\omega} - E_{\xi_\omega}$

$$D_{\xi_\omega} = \bar{D_{\xi_\omega}} - c\tilde{\xi}_\omega + A_{\xi_\omega} + E_{\xi_\omega}$$
$$B_{\xi_\omega} = \bar{B_{\xi_\omega}}$$

(Case5) $A_{\xi_\omega} - c\tilde{\xi}_\omega < 0$かつ$A_{\xi_\omega} + E_{\xi_\omega} < c\tilde{\xi}_\omega$かつ$\bar{D_{\xi_\omega}} < c\tilde{\xi}_\omega - A_{\xi_\omega} - E_{\xi_\omega}$かつ$\bar{B_{\xi_\omega}} \geq c\tilde{\xi}_\omega - A_{\xi_\omega} - E_{\xi_\omega} - \bar{D_{\xi_\omega}}$

$$D_{\xi_\omega} = 0$$
$$B_{\xi_\omega} = \bar{B_{\xi_\omega}} - c\tilde{\xi}_\omega + A_{\xi_\omega} + E_{\xi_\omega} + \bar{D_{\xi_\omega}}$$

(Case6) $A_{\xi_\omega} - c\tilde{\xi}_\omega < 0$かつ$A_{\xi_\omega} + E_{\xi_\omega} < c\tilde{\xi}_\omega$かつ$\bar{D_{\xi_\omega}} < c\tilde{\xi}_\omega - A_{\xi_\omega} - E_{\xi_\omega}$かつ$\bar{B_{\xi_\omega}} < c\tilde{\xi}_\omega - A_{\xi_\omega} - E_{\xi_\omega} - \bar{D_{\xi_\omega}}$

$$D_{\xi_\omega} = -c\tilde{\xi}_\omega + A_{\xi_\omega} + E_{\xi_\omega} + \bar{D_{\xi_\omega}} + \bar{B_{\xi_\omega}}$$
$$B_{\xi_\omega} = 0$$

T'における管理会計情報は，すなわち時点$t = T + 1$の管理会計情報であり，会計情報を継続的に作成することが可能である．このように橋梁部材後とに計算した会計情報を，橋梁構成部材にわたり単純集計することにより，個別橋梁，さらには橋梁システム全体のをマネジメントするための管理会計情報を得ることができる．

4　台帳システムの開発に関する検討

台帳システムは，各橋梁の諸元データをはじめ，資産会計システム，マネジメントシステム，点検・修繕システムにより作成された新しい情報を蓄積し，保存するシステムである．また，ユーザーとのインターフェースもこのシステムで行う．アセットマネジメントシステムにおいて，点検データ等の情報の蓄積は非常に重要であり，台帳システムはBMSの核となるものであると考えられる．本研究会では，既存のデータベースを有効に利用しつつ，新たに求められるデータセットについての検討を重ねている．

4.1　既存データ

現在，姫路河川国道事務所では，橋梁諸元に関するデータベースであるMICHI，及び橋梁点検の結果を蓄積するデータベースを管理している．

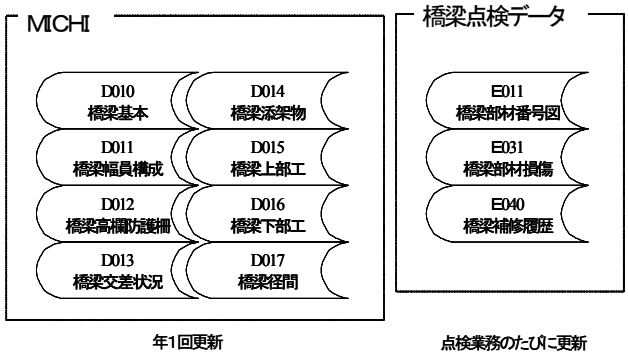


図４－１　既存データテーブル

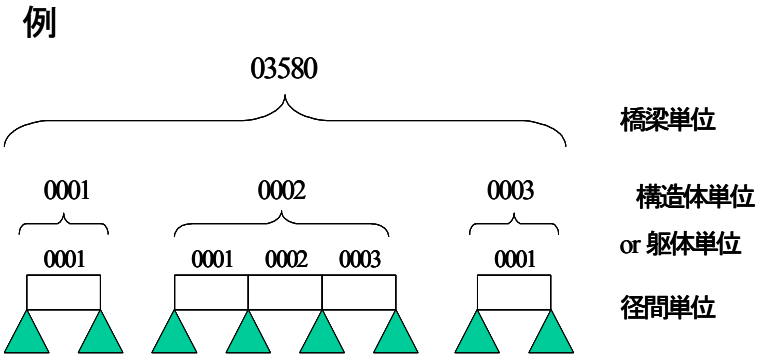


図４－２　整理番号との対応

- D015・D016・D017・E011・E031テーブルでは，地建C，事務所C，整理番号1，整理番号2，整理番号3によって各橋梁の径間まで特定できることができる
- 整理番号1…橋梁コード+分割区分（上りor下りなど）
- 整理番号2…構造体（上部工）or　躯体（下部工）を指定
- 整理番号3…径間を指定
- その他，D011・D012・D013・D014では整理番号2が1つの橋梁で異なる形式を持つ場合などに区別するために用いられている
- E011，E031ではさらに細かく部材エレメントごとのデータに分けられている

4.2 データ整備状況

各データテーブルより，事務所コード「51」(姫路)，路線「0002」(国道2号線)で抽出した結果，各テーブルに存在する橋梁数は**表４－１**のようになった．

表４－１　橋梁数

データテーブル	橋梁数
「D010橋梁基本」	２３８橋
「D011橋梁幅員構成」	２２９橋
「D012橋梁高欄防護柵」	２３０橋
「D013橋梁交差状況」	２１８橋
「D014橋梁添架物」	４橋
「D015橋梁上部工」	２１６橋
「D016橋梁下部工」	１９４橋
「D017橋梁径間」	２１０橋
「E011橋梁部材番号図」	１１８橋
「E031橋梁部材損傷」	１０８橋

「D014橋梁添架物」を除くMICHIデータテーブルすべてに含まれている橋梁は１７０橋であった．さらに橋梁点検データテーブルにも含まれているものは，７５橋のみに止まった．また，橋梁名が存在していても，その諸元データに欠落が見られ，紙ベースで眠っている情報の早期電子化が求められる．

橋梁構造物は，その形式や建設された年代，適用示方書，立地条件（環境条件），使用条件（交通量，凍結防止剤等）が多岐に亘る．推移確率を設定する場合にも，橋梁を諸条件により分類しておくことは有効なことだと考えられる．参考までに，２号バイパスの橋梁について，示方書，橋梁形式の観点でMICHIデータベースより集計した結果を**表４－２**に示す．

表４－２　諸元別橋梁数

路線名称	適用示方書	PC橋	RC橋	鋼（鉄）リベット橋	鋼溶接橋	橋梁形式不明	合計
2号加古川バイパス	不明	1	2			15	
	昭和39年	12	2		14		46
2号姫路バイパス	昭和39年	50		9	6		
	昭和47年　道路橋示方書	38	2		11		
	昭和53年　道路橋示方書	10		2			
	昭和55年　道路橋示方書	1	2		4		
2号姫路バイパス側道	不明					5	140
2号太子竜野バイパス	昭和53年　道路橋示方書	8	8		2		
	昭和55年　道路橋示方書		7	2	2		29
合計		120	23	13	39	20	215

5　BMSVer.2

前章までに述べてきた橋梁マネジメント手法を，実務において適切に執行していくためには，視覚的理解を助ける機能，膨大なデータを整理･加工または検索･抽出する機能，半自動的に最適マネジメント計画を作成する機能などを有する，パソコン上での操作可能なアプリケーションの開発が求められる．

5.1　システムの全体構成

本研究では**図５－１**に示すBMSを提案する．本システムは３つのサブシステムにより構成される．台帳システムは，諸元データ，点検データ，補修工法データ，劣化予測データと最適戦略データを管理するモジュールにより構成され，個々の橋梁とその部材に関するデータを管理し，橋梁システム全体をシステムの現状を一元的に把握することのできるものとなっている．また，システム内部には，現状の点検データに基づいて，不確実性を有する橋梁の劣化過程を確率的に推計することのできる機能，また構成部材の状況依存的な最適戦略をマルコフ決定モデルにより求める機能を備えており，これらは本システムの特長的な機能となっている．

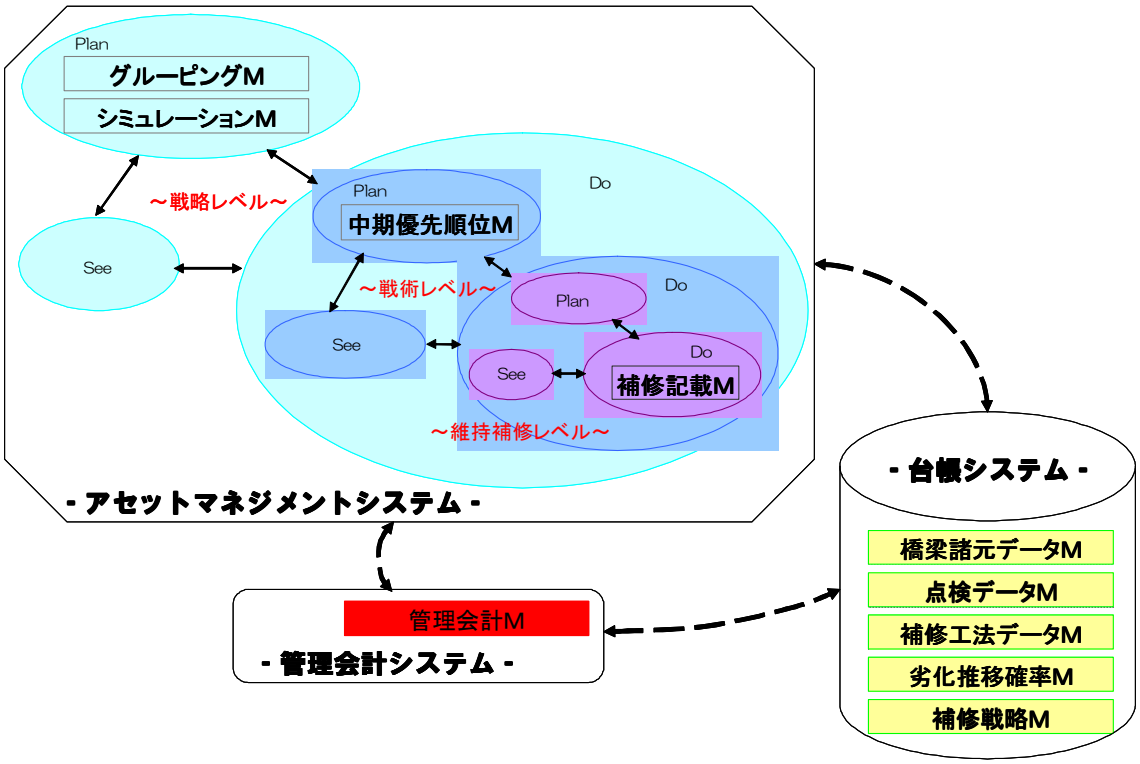


図５－１　BMSVer.2の全体構成（再掲）

5.2　各画面説明

5.2.1　台帳システム

台帳システムは，橋梁マネジメントを行うために不可欠な管理下にある橋梁（あるいは，その部材）の，諸元，点検，補修工法，劣化予測と補修戦略に関する情報を一括して管理するためのシステムである．台帳システムを適用するためのアプリケーションは，そのサブシステムに基づいて，５つのモジュールを内包しており，以下にそれぞれの概要を述べる．

「橋梁諸元モジュール」

本モジュールは，「MICHI」データベースを基に，管理下にある橋梁のデータから，橋梁マネジメントに必要な項目を抽出することができるインターフェースを搭載している（**図５－２**参照）．これにより，橋梁マネジメントのための橋梁システム全体の仕様把握をアプリケーション内で一括して行うことが可能である．

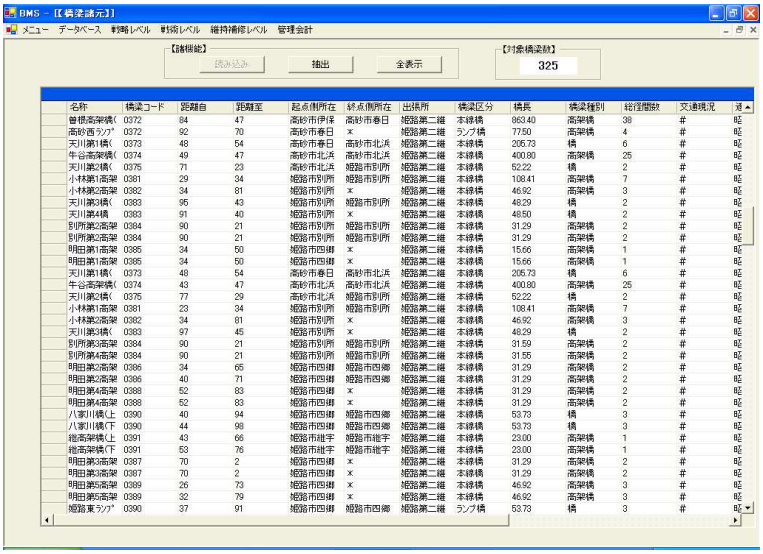


図５－２　橋梁諸元モジュール画面

「点検データモジュール」

「MICHI」と当該事務所による最新の点検データを基に，橋梁システム全体の劣化状態が個別橋梁，径間毎に集計され，橋梁マネジメントを目的とした，橋梁システム全体の現状把握ができるインターフェースを搭載している（**図５－３**参照）．その集計化の過程では，劣化推移確率モジュール，アセットマネジメントシステム，管理会計システムで必要となる橋梁部材毎の劣化状態に関するデータ（点検日，橋梁名，径間番号，部材数，部材毎の健全度分布など．以下，劣化状態データと称す）が生成される．また，点検データが未整備となっている橋梁に対してはマニュアルで現状を入力することも可能となっている．

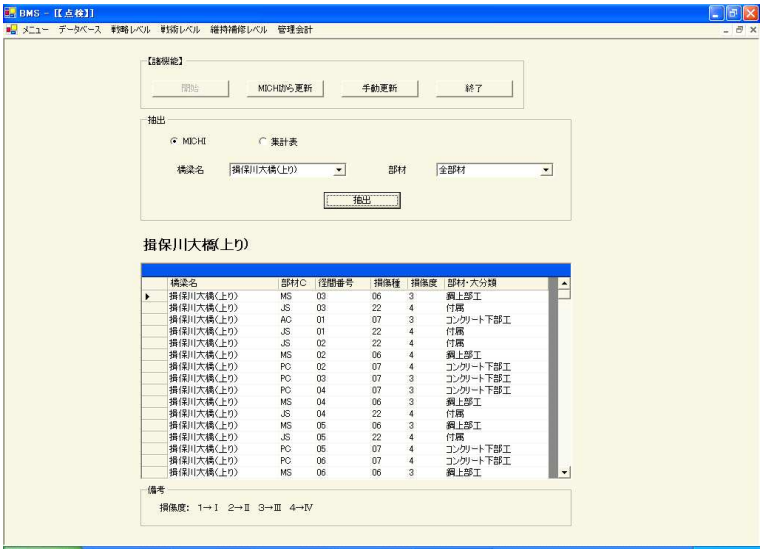


図５－３　点検データモジュール画面

「補修工法モジュール」

橋梁システムを構成する部材に対して適用される補修工法の基礎情報を格納する（**図５－４**参照．橋梁部材や健全度毎に設定された補修工法に関する情報を確認することができる．補修工法データは，修繕工法名，部材区分，部材番号，損傷形態，損傷度，単価，単価単位，特記事項をインプットできる．また，新たな補修工法が開発，導入される場合には，それらの新情報を任意に追加・削除・変更を本モジュールで行うことができる．

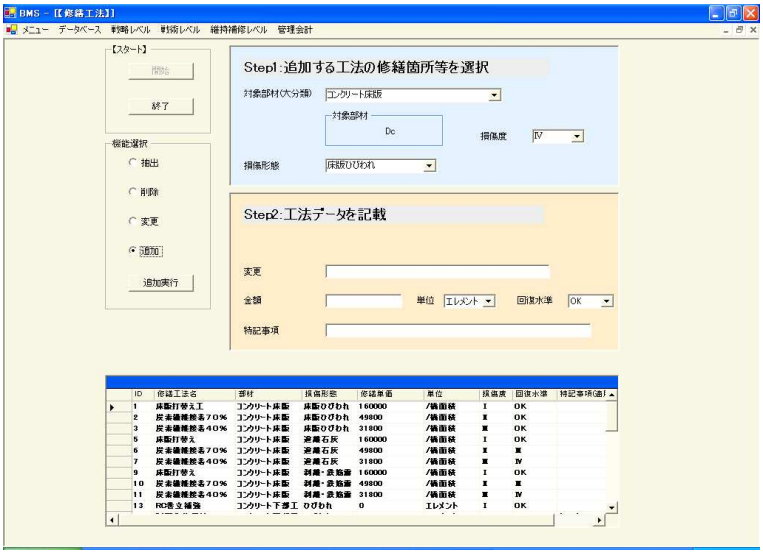


図５－４　補修工法モジュール画面

「推移確率推計モジュール」

「MICHI」による橋梁諸元データと点検データモジュールにより生成された劣化状態データを基に，ハザードモデルにより橋梁部材の劣化推移確率を推計できるインターフェースを搭載している（**図５－５**参照）．推計に必要なデータは，点検調査年月日及び損傷度である．さらにハザード率を特定するために，劣化に影響を及ぼす説明変数を任意にインプットデータとして追加し推計することにより，モデルに影響を与えている説明変数の感度分析を行うことができる．劣化推移確率の推計は分類したグループ単位で推計することができる．このように推計した結果は，離散的な健全度間の推移確率行列として導出される．ただし，ハザードモデルによる劣化推移確率の推計は，ある程度の点検データの蓄積を前提としており，点検データが蓄積されていない部材については，本モデルによって推計することはできない[?]．この場合の対処法として，当該部材の各健全度の期待寿命長から，マルコフ劣化推移確率を計算する機能を搭載した．既往の研究や当該部材の性能規定等から推測される各健全度の期待寿命長$E[RMD_i]$を外生的に与えることによって，健全度ハザード率θ_iは，

$$\theta_i = \frac{1}{E[RMD_i]} \tag{5.1}$$

により求めることができる．このハザード率θ_iを，式 (2.61) に代入することによって，マルコフ推移確率行列を導出することができる．

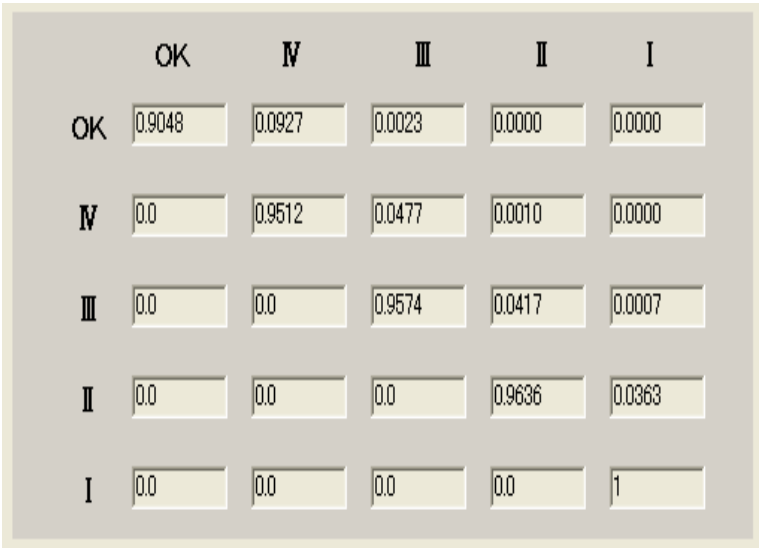


図５－５　推移確率推計モジュール画面

注）図は最適補修戦略を求めた後，平均費用法による
ライフサイクル費用をコンクリート床版に対して抽出した時の例である．

「補修戦略導出モジュール」

橋梁を構成する橋梁部材毎に，劣化推移確率モジュールにより推計された劣化推移確率と補修工法モジュールにより設定された補修工法データを用いて，補修戦略を導出し，ライフサイクル費用評価モデルによる費用情報を算出，確認できるインターフェースを搭載している（**図５－６**参照）マルコフ決定モデル最適補修戦略のみではなく，劣化が進行しないうちに補修を行う予防補修戦略，劣化がある程度進行してから補修を行う事後補修戦略，あるいは任意の補修戦略といった，様々な補修戦略に対応し，さらには橋梁部材毎，損傷形態毎，平均費用法と割引現在価値法の双方の評価方法により，補修工法名や補修後回復水準をはじめとする工法データと，平均費用，相対費用，ライフサイクルコストという費用データの２つのデータが同時に形成される（以下，補修戦略データと称す）．アセットマネジメントシステム内でシミュレーション実験を行う際，また，管理会計システム内で管理会計情報を作成する際に，ここで形成された補修戦略データが必須情報として提供される．

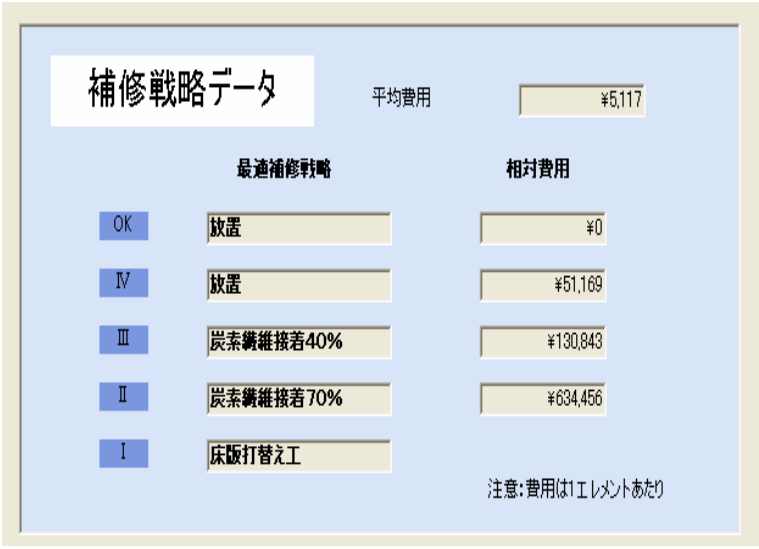


図５－６　補修政策導出モジュール画面

注）図は最適補修戦略を求めた後，平均費用法による
ライフサイクル費用をコンクリート床版に対して抽出した時の例である．

5.2.2　マネジメントシステム

マネジメントシステムは，台帳システムから提供されるデータをもとに，マネジメントに有用な各種情報を導出する．

「グルーピングモジュール」

橋梁管理者の維持管理方針により，管理下にある橋梁をグルーピングできる機能を搭載した（**図５－７**参照）．グルーピングの要領については，管理者の政策的判断に則り，所属グループの変更，グループ名の変更，新たなグループの策定を行うことができる．本モジュールによるグルーピングの結果は，橋梁毎に所属グループが記録されるという形で保存され，シミュレーションの実行と（戦術レベルによる）補修の中期優先順位の決定に大きく寄与するものである．

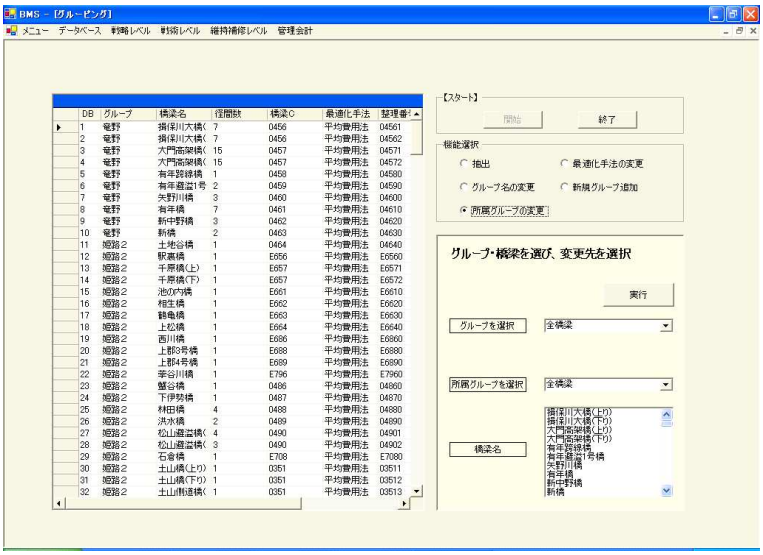


図５－７　グルーピングモジュール画面

「シミュレーションモジュール」

管理者が橋梁システム全体を管理する上で，維持管理方針や課され得る制約条件を反映させて，長期的な橋梁システム全体の劣化・補修シミュレーションを行い，さらに繰延維持補修会計原則に基づく会計情報をシミュレートする機能を搭載した（**図５－８**参照）．本モジュールでは，政策的にグルーピングされた橋梁群毎に，シミュレーションが行われる．インプットデータとしては，台帳システムから提供される橋梁システムの構成に関わる全般のデータに加えて，グルーピングモジュールによるグルーピングの結果が必要となる．さらに，モジュール内で，制約条件（予算制約・状態制約），構成部材の各々の代表的な損傷とその補修戦略，シミュレーションの実行過程における補修順位の選定方法，モンテカルロ法によるシミュレーション試行回数，試行年数を設定し，先に示したモデルに適用することで，長期的な維持管理計画立案のためのアウトプットが提供される．そして，全橋梁もしくは個別橋梁の管理会計情報がシミュレートされたものを経年的に表示された図がアウトプットとして提供される．会計情報の考え方については前章で既述したとおり，設定した条件のもと，橋梁システム全体あるいはそれを構成する橋梁のサービス水準や補修の積み残しを会計情報の形式により，管理者が望ましい維持管理計画立案することを支援する．さらに，橋梁とその構成部材毎に経年的な健全度分布を示した図とシミュレーション期間に毎年費消される費用の期待値を記した図，さらに，補修が先送りされた部材数を集計し経年的に示した図，あるサンプルパスの毎年の補修順位リストもアウトプットされ，管理者が柔軟に長期的な維持管理計画立案することを可能としている．



図５－８　シミュレーションモジュール画面

「中期優先順位モジュール」

上記のシミュレーションモジュールによるアウトプットを軸に，橋梁管理者は長期的な維持管理計画を立案するが，これを中期的な維持管理計画立案に反映させる必要があり，本モジュールでは，台帳システムによるデータも加味して，中期的な維持管理のための補修リストを作成する機能を搭載した（**図５－９**参照）．中期的な視点では，点検データの更新等が行われ，また単純に定量化された指標のみで補修順位を決定するのではなく，政策にまつわる定性的な議論からこれを決定する必要がある．ここでは，シミュレーション結果と台帳システムのデータから機械的に中期的な維持管理計画案を策定することを試みているが，最終的な決定にあたっては管理者の政策的判断による裁量の余地を残していることを留意されたい．



図５－９　中期優先順位モジュール画面

「補修記載モジュール」

個別の橋梁に対して補修が現実に施工されると，その情報を橋梁マネジメントシステム内にインプット，反映させる必要があり，本モジュールでは，補修の実施を記録する機能と過去に施工された補修を確認する機能を搭載したインターフェースを構築した（**図５－１０**参照）．ここで作成される施工された補修に関する，橋梁，橋梁コード，補修対象部材，補修工法，補修費用の各データはシステム内部に蓄積されると同時に，中期優先順位モジュールにより提供される補修リストが更新され，また会計年度毎に管理会計を帰結するための情報として管理会計システムに提供される．



図５－１０　補修記載モジュール画面

5.2.3　管理会計システム

「管理会計モジュール」

管理会計システムは，台帳システムとアセットマネジメントシステムより提供される，補修戦略データ，シミュレーションデータ，補修記載データを基に，橋梁システム全体の会計年度毎の会計情報を帰結し，橋梁システム全体と構成する個別橋梁のサービス水準や補修の達成度を会計情報として確認できるシステムであり，これらの機能を備えたインターフェースを管理会計モジュールとして搭載した（**図５－１１**参照）．アセットマネジメントシステム内の会計シミュレーションは劣化・補修シミュレーションに基づく仮想的な会計情報であったのに対して，ここで提供される会計情報は，橋梁システム全体の点検と補修実施による現況を反映して，繰延維持補修会計原則により構築される，現実的なデータであることを強調しておく．本モジュールにより，管理者は橋梁システム全体の現況と維持補修に要する予算獲得に伴う，業務評価を財政管理者に対して行うことが可能である．



図５－１１　管理会計モジュール画面

6　おわりに

以下に、本研究の成果を挙げる。

- アセットマネジメントシステム概念の構築
- 点検履歴に基づく推移確率推計モデルの構築
- 平均費用最小化原則に基づく最適補修政策導出モデルの構築
- 経年的シミュレーションモデルの構築
- 橋梁資産会計システムの構築
- 橋梁毎の補修箇所の選定に関する検討
- データ整備状況の把握
- データの保存・更新・追加方法に関する検討
- 橋梁マネジメントの実用性に関する検討
- BMSVer.2の作成