

都市高速道路のアセットマネジメント —リスク評価と財務分析—

阪神高速道路株式会社 坂井康人^{*1}

中央復建コンサルタンツ㈱ 慶道 充^{*2}

大阪大学大学院 貝戸清之^{*3}

京都大学経営管理大学院 小林潔司^{*4}

By Yasuhito SAKAI, Mitsuru JIDO, Kiyoyuki KAITO
and Kiyoshi KOBAYASHI

旧道路関係4公団は平成17年に民営化され、道路会社として高速道路を管理運営している。民営化の前提として、道路会社は民営化から45年以内に債務を完済すること、管理する施設を適切な管理水準に維持すること、が義務付けられている。そのためには、債務の返済を考慮した維持管理計画を策定し、その計画を確実に実行しなければならない。維持管理の期間が45年の長期となることから、計画策定にあたっては、施設の劣化リスクを考慮する必要性があり、リスクマネジメントの構築が重要な課題となる。そこで本研究では民間企業に対するリスクマネジメントの体系として内部統制の枠組みが有効であると考え、都市高速道路の内部統制とリスクマネジメントを考慮したアセットマネジメントを提案する。提案に際しては、はじめに、内部統制の枠組みとリスクマネジメントを考慮した阪神高速道路の業務プロセスシステムについて整理する。この結果に基づき、劣化の不確実性をリスクとして考え、劣化リスクと維持管理費の関係について検討を行った上で、債務返済計画に活用可能な財務情報の提供を試みる。さらに、継続的な業務改善の一つとして径間ごとの劣化速度の相対評価に基づく重点課題の抽出についても具体的な事例をもとに提案手法の有効性を検証する。

【キーワード】アセットマネジメント、リスクマネジメント、相対評価、財務分析

1. はじめに

旧道路関係4公団（日本道路公団、首都高速道路公団、阪神高速道路公団、本州四国連絡橋公団）は平成17年に民営化され、高速道路会社として道路資産の維持管理等の運営を実施している。これらの道路会社は道路資産の管理水準を適切に維持させながら、債務を返済し、最終的に民営化後45年で債務を償還することが義務付けられている。

民営化時に債務と資産は独立行政法人日本高速

*1 建設事業本部 TEL : 072-226-4795

*2 保全技術系グループ TEL : 06-6160-3216

*3 工学研究科 特任講師 TEL : 06-6879-7598

*4 経営管理講座 教授 TEL : 075-383-3224

道路保有・債務返済機構（以下、機構）に移管され、道路会社は機構から、高速道路資産を借り受けて維持管理を行う。このとき、通行料金収入から維持管理費用を差し引いた費用をリース料として機構に支払い、機構はリース料収入で債務を返済する。道路会社と機構は概ね5年毎に債務の返済と維持すべき管理水準についての計画を協定として締結する。そのために、道路会社は民営化から45年後の償還期限までの債務返済を念頭におきながら、適切な管理水準を維持できるように計画的な維持管理を実施しなくてはならない。計画期間が長期にわたるため、劣化の不確実性と、交通量の不確実性という2つの異なるリスクに曝されることになる。特に、

構造物の劣化に関する不確実性については、道路会社の長期的な財政状況に大きな影響を与えることが考えられるために、適切にマネジメントする必要がある。

このような状況で維持管理の実効性を高めるためには、①適切に管理水準を維持し、かつ確実債務を返済できる維持管理計画の策定、②計画を実行・評価・改善するための業務プロセスシステムの構築、が重要な取り組み課題となる。

①の取り組み課題については、2つの要素が考えられる。

1つめは、劣化した部位を補修して、健全な状態に回復させる取り組みである。阪神高速道路では、平成14年度から合理的な維持管理を支援するための阪神高速道路橋梁マネジメントシステム（以下、H-BMS：Hanshin expressway Bridge Management System）に関する検討を進め、平成19年度にH-BMS ver.2.0を構築した^{1),2)}。このBMSは、点検履歴から確定的な劣化曲線を統計的に推計し、それに基づいた将来の維持管理費用を推計する。現行システムは確定モデルであるため、劣化リスクを考慮するためには、劣化過程の不確実性によって生じる健全度低下リスクを適切に評価することが必要となる。

2つめは、部材の改良等によって、管理水準の底上げを図る取り組みである。例えば、昭和39年以前の道路橋示方書に準拠した橋梁のRC床版に対する鋼板補強があげられる。この取り組みは、1つめにあげた取り組みとは違い、全社的な課題として集中的に対応することで、管理水準の底上げが可能になる。

②の取り組み課題については、阪神高速道路ではH-BMSの開発と並行して、アセットマネジメントの政策評価を持続的に実施するために、ロジックモデル³⁾の検討を行っている。また、道路会社は民間化されたものの、高速道路という社会インフラを管理するため、高い公共性を有しており、その管理運営にあたっては、効率性や透明性を確保しておくことが必要である。効率性や透明性を確保する手段として、近年、資本金が5億円以上の公開会社に求められる内部統制の仕組みが考えられる。内部統制は、企業に

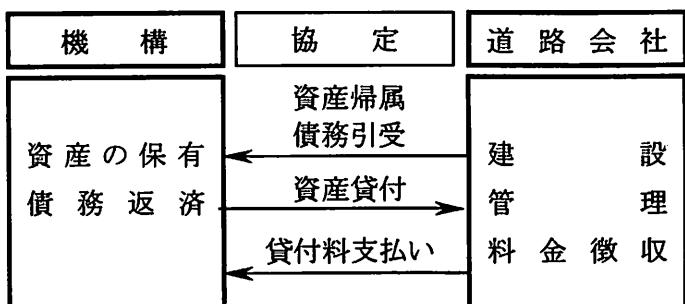


図-1 協定の枠組み

おいて事業に関連するリスクをコントロールする仕組みである^{4),5)}。そのため、内部統制はリスクマネジメントと一体と考えることができる。保全業務は道路会社の利用者に対するサービスレベルに直結するために、阪神高速道路の維持管理に係るリスクを評価し、適切にマネジメントできる業務プロセスシステムを構築していくことが必要である。内部統制の枠組みは、リスクマネジメントを考慮した業務プロセスシステムを構築するために有効な枠組みである。

本研究では、阪神高速道路を事例に、道路資産の技術管理水準の向上と構造物保全に関する維持管理費用リスクの管理を目的としたリスクマネジメントを遂行しうる業務プロセスシステムを提案する。さらに、提案した業務プロセスシステムを用いて、構造物の劣化リスクを評価するとともに、劣化リスクと維持管理費リスクの関係を分析し、債務返済計画に活用可能な財務情報の提供を試みる。さらに、継続的な業務改善事例の1つとして相対評価に基づく重点課題の抽出について考察する。

以下、2. で民営化後の財務返済計画の概要をとリスクマネジメントの重要性について整理する。そのうえで、3. ではリスクマネジメントを考慮した道路会社の業務プロセスシステムについて検討する。4. と5. ではH-BMSの活用方法として、重点課題の整理とリスク評価と財務分析について述べる。6. で数値計算事例を示す。

2. 民営化後の枠組み

(1) 民営化の概要

旧道路関係4公団は平成17年に民営化され、高速道路会社として管理する道路資産の維持管理等の運営を委託された。民営化に伴い、道路

資産と負債を管理する機構と高速道路を管理・運営する道路会社が設立された。道路会社は機構から道路資産を借り受け、通行料金収入からリース料を支払う（図-1）。機構は道路会社からのリース料で債務を返済し、民営化から45年後までに債務を完全に返済しなければならない。リース料や、債務の返済計画については、道路会社と機構との間で締結される協定で決定され、協定は概ね5年毎に見直される。機構との協定では以下に示す内容が規定される⁶⁾。

- 工事の内容及び工事に要する費用に係る債務引受限度額
- 修繕に係る工事の内容
- 修繕に係る工事に要する費用に係る債務引受限度額
- 災害復旧に要する費用に係る債務引受限度額
- 無利子貸付貸付計画
- 道路資産の貸付料の額
- 計画料金収入の額
- 料金の額及び徴収期間

（2）債務返済計画

阪神高速道路と機構との協定の中では、各種の債務引受限度額や貸付料や料金収入の額等が規定されており、債務の返済計画については、道路会社と機構のそれぞれに収支予算の明細で示される。

道路会社は保全にかかる費用を、原則として通行料金収入から調達しなければならない。しかし、維持修繕工事において、資産形成とみなされる工事については、通行料金以外の手段で調達することとなっている。借入によって調達した場合には、新たに負債が発生する。新たな負債は機構に移管され、貸付料で返済することとなる。機構との協定において維持修繕費用の調達方法が詳細に規定されている。このため、維持修繕計画の内容は、債務返済リスクに少なからず影響を及ぼすことになる。阪神高速道路会社のリスクマネジメントの立場から、劣化リスクと維持管理費リスクを定量的に評価し、維持管理費リスクが債務返済計画に与える影響を適切に評価する財務シミュレーションのシステム

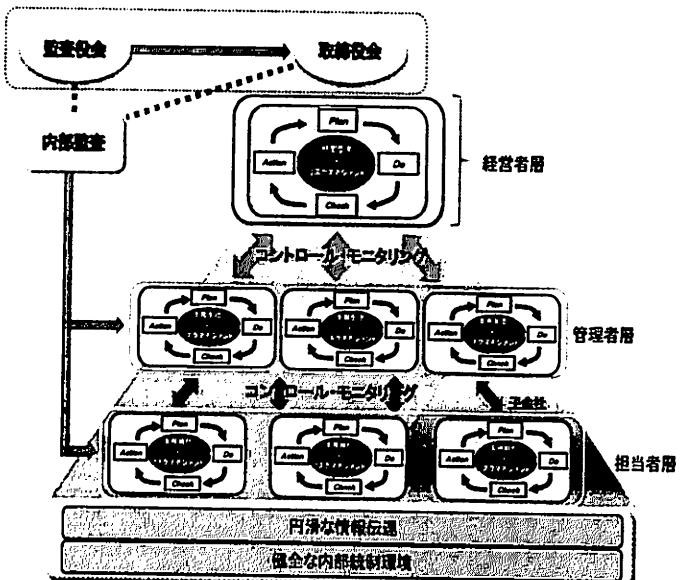


図-2 内部統制とリスクマネジメント⁵⁾

の開発が必要となる。

（3）内部統制とリスクマネジメント

企業の社会的責任を踏まえて企業価値を向上させるためには、企業リスクマネジメントのプロセスが要請される。このプロセスが内部統制であり、わが国では2006年にJ-SOX法制定によって、企業にも内部統制の仕組みが要請されるようになった。図-2に、内部統制の全体図を示す⁵⁾。図-2は、経営者、管理者、担当者の各層が互いにコントロール・モニタリングをしながら、それぞれがPDCAサイクルによって継続的に改善する枠組みを示している。この枠組みには子会社も含まれ、各層の情報を円滑に伝達できる環境の構築を目指すこととなる。

阪神高速道路も民営化に伴い、内部統制の仕組みを構築する取り組みを進めている。その中で、道路資産の保全業務におけるリスクマネジメントが重要な課題となっている。保全業務は阪神高速道路の利用者が晒されるリスク水準や道路会社としての財務リスクに直結するために企業のリスクマネジメントの立場から、保全業務の適切化が常に求められている。

3. 業務プロセスシステム

（1）業務プロセスシステムの前提条件

リスクマネジメントを想定した業務プロセスシ

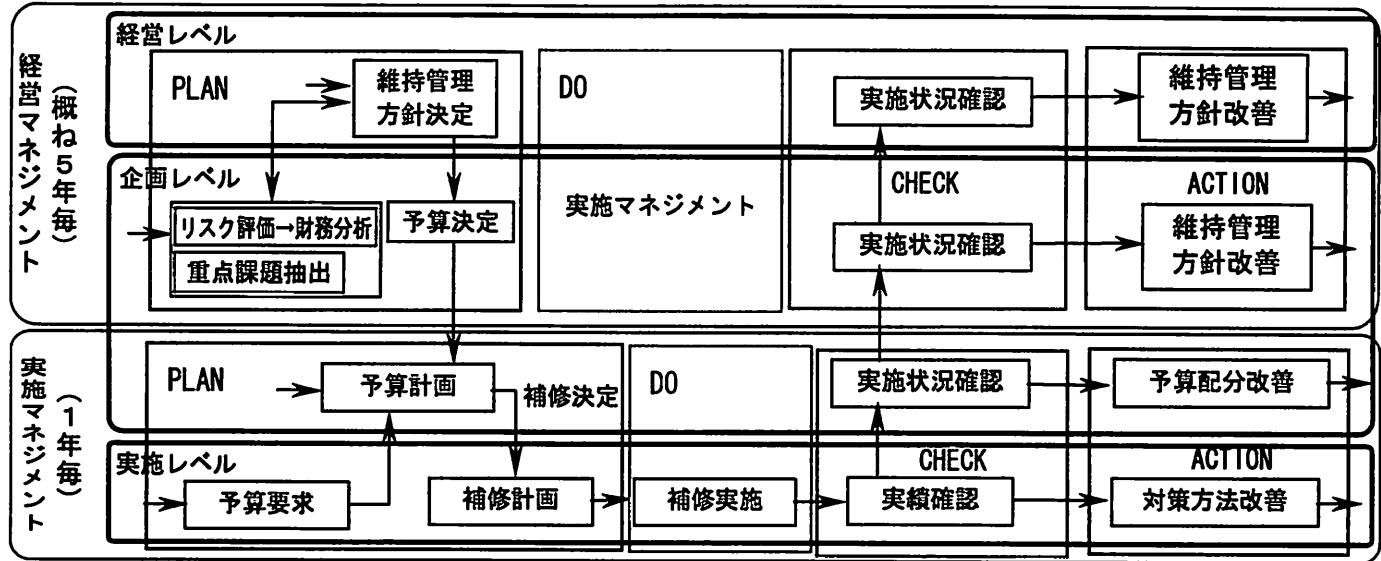


図-3 業務プロセスシステム

ステムの構築のために、次の a) から d) を考慮する。

a) 階層構造

図-2 には「経営者層」「管理者層」「担当者層」の3段階の階層が示されている。

阪神高速道路の保全業務においては、保全業務を統括する執行役員、維持管理計画を立案し、かつ予算配分を実施する企画グループ、現場の維持管理を担当する管理部が存在し、3階層になっている。そこで、阪神高速道路の階層構造を上から「経営レベル」、「企画レベル」、「実施レベル」と呼ぶこととする。

b) マネジメントサイクル

事業を継続的に改善させるためには、計画を実行するだけでなく、実行した結果をチェックし、改善策を講じ、次の計画につなげる PDCA によるマネジメントサイクルを形成する必要がある。

c) 技術的な改善達成が可能なサイクルの考慮

阪神高速道路は維持管理を主な業務とする。継続的に業務を改善するためには、全社的な取り組み課題を抽出し、重点課題として取り組むことが考えられる。

実際に、阪神高速道路は鋼製橋脚の隅角部疲労対策や鋼床版疲労対策等の重点課題に対して、全社的な取り組みを行ってきた。これらの重点課題は損傷が顕在化してからの対策が多い。重点課題に対する取り組みを業務プロセスシステ

ムに組み込んでおけば、継続的に課題をみつけていく取り組みがなされ、損傷が顕在化する前に重点課題を発見できる可能性を高められる。

d) マネジメントの階層性の考慮

阪神高速道路に限らず、一般的な維持管理業務においては、中長期的な維持管理方針を策定する段階と、維持管理方針に従って、維持管理を実施する2つの段階が存在すると考えられる。つまり、2つのマネジメントの階層が存在し、上位の階層を「経営マネジメント」、下位の階層を「実施マネジメント」と呼ぶことにする。阪神高速道路の業務プロセスシステムを改善するためには、組織の階層性だけでなく、マネジメントの階層性も同時に考慮したようなアセットマネジメントシステムを構築する必要がある。

(2) 業務プロセスシステム

図-3 に阪神高速道路のリスクマネジメントを想定した業務プロセスシステムを示す。

a) 経営レベル

経営レベルは役員が構成員であり、保全業務における維持管理方針の意思決定を行う。経営レベルでは企画レベルから報告された維持管理計画（案）や重点課題に対して、承認を与える等の意思決定を行う。

b) 企画レベル

企画レベルは保全業務の中長期計画の策定、重点課題の抽出、および毎年の維持管理予算額を

策定する。H-BMS は主に、このレベルで活用される。

c) 実施レベル

実施レベルは経営レベルで決定された維持管理方針と毎年の配分予算のなかで維持管理を実施する。

(3) 経営マネジメント

a) リスク評価、及び財務評価による管理水準と維持管理費用の決定

リスクマネジメントの視点から、長期的に、阪神高速道路の管理水準を維持するための維持管理方法とその達成確率について評価する。

b) 協定の締結

リスク評価、財務評価に基づき、最適な管理方法で機構との協定を締結する。

c) 経営方針（維持管理方針）の策定

a), b)を踏まえた上で、経営方針を策定する。特に、阪神高速道路は b)の制約によって、今後の経営方針が影響されるために、協定の締結で定められた維持管理費用に対して、構造物の劣化リスクがどの程度存在しているかを、定量的に評価し、経営方針を策定する必要がある。協定の見直し間隔にあったマネジメントサイクルを構築することが必要である。

(4) 実施マネジメント

実施マネジメントでは、毎年の予算枠と確保すべき管理水準が与条件として与えられ、このなかで、より効果的な補修計画が策定される。補修箇所の選定にあたっては、直近の点検データや、劣化予測に基づく短期予測などを参考にすることが考えられる。直近の点検データを地図表示するなどして、視覚化しておけば、補修計画時に有効な情報を与えると考えられる。毎年与えられた予算のなかで補修計画が立てられることから、1 年毎のマネジメントサイクルとなる。

4. 重点課題の抽出

(1) 相対評価による重点課題の抽出

阪神高速道路では、土木構造物を対象とした点検要領⁷⁾を策定しており、主に目視点検によって構造物の状態を観測している。表-1 と表-2 に、

表-1 定期点検の判定区分

判定区分		損傷状況
S	S1	機能低下が著しく、道路構造物の安全性から緊急に対策の必要がある場合
	S2	第三者への影響があると考えられ、緊急に対策の必要がある場合
A		機能低下があり、対策の必要がある場合
B		損傷の状態を観察する必要がある場合
C		損傷が軽微である場合
OK		上記以外の場合

表-2 定期点検の頻度

点検区分		頻度	点検方法
橋梁	上下部工点検	1回／5～8年	近接目視、必要に応じ、たたきおよび簡便な計測
	はり上点検	上下部工点検の中間年	
	土工部点検	1回／年	
	トンネル点検	1回／5年を原則	
	カルバート点検	1回／5～8年	
	舗装点検	本線 ランプ 1回／2～3年 1回／4～6年	

表-3 定期点検の頻度

路線	管理番号	点検年度	判定区分	点検年度	判定区分	点検年度	判定区分
路線1	281	1989	OK	1992	B	1997	A
	357	1989	OK	1992	A	1997	A
	319	1989	OK	1992	A	1997	B
路線2	4-8	1994	OK	1998	B	2003	C
路線3	3	1992	OK	1996	B	2002	OK

定期点検の判定基準と頻度および方法を示す。

阪神高速道路は 4～8 年の間隔で近接目視による定期点検が実施され、構造物の健全度が判定される。点検履歴(表-3)を確認すると、点検間隔が 5 年程度にもかかわらず、点検結果が健全である OK から補修が必要と判断される A になっている径間や、短い点検間隔のなかで OK から B に劣化している径間が存在する。橋梁は比較的寿命が長いといわれるなか、劣化が速いと評価されるのには、何らかの原因があるものと考えられる。このような箇所は全体と比較して、相対的に劣化が速くなっていると考えられる。継続的な改善を目指すためには、経営マネジメントにおいて、中長期的な維持管理計画を策定するだけでなく、相対的に劣化が早い径間を抽出し、劣化が早くなる原因を追究することが重

点課題の抽出につながる。

何らかの原因で、劣化が早くなっている場合、その原因を除外するにより、施設全体の劣化速度を改善することができ、コスト縮減等の改善につながる。この点を視野に入れて、小濱等⁸⁾は点検結果を統計的に分析し、橋梁ごとの相対的な劣化速度を評価する手法を開発した。

(2) 相対評価の方法

本研究では、小濱等の手法を用いて劣化速度の相対評価を実施する。相対評価モデルは多段階指指数ハザードモデル⁹⁾で推計された劣化パラメータ θ をベンチマークとして、径間毎の劣化速度がベンチマークからどの程度ずれているかを推計するモデルである。

多段階指指数ハザードモデルの推計では、各区間の健全度ごとにハザード率を設定した。さらに、健全度別のハザード率が時間に依存しない指指数ハザードモデルとした。

$$\lambda_i(y_i) = \theta_i \quad (1)$$

ここに、 i は部材の健全度、 $\lambda_i(y_i)$ はハザード関数、 y_i は時間軸上の時点、 θ_i は定数（未知パラメータ）である。ハザード関数 $\lambda_i(y_i)$ はある時点 y_i で、健全度が i であることがわかっている部材が次の瞬間も i に留まる条件付き確率を表している。

多段階指指数ハザードモデルを用いた場合、マルコフ推移確率は劣化の進展度合いに応じて、以下のように表現される。

（健全度の推移がない場合）

$$\pi_{ii} = \exp(-\theta_i Z) \quad (2)$$

（1ランク健全度が推移する場合）

$$\pi_{ii+1} = \frac{\theta_i}{\theta_i - \theta_{i+1}} \{ -\exp(-\theta_i Z) + \exp(-\theta_{i+1} Z) \} \quad (3)$$

（2ランク以上健全度が推移する場合）

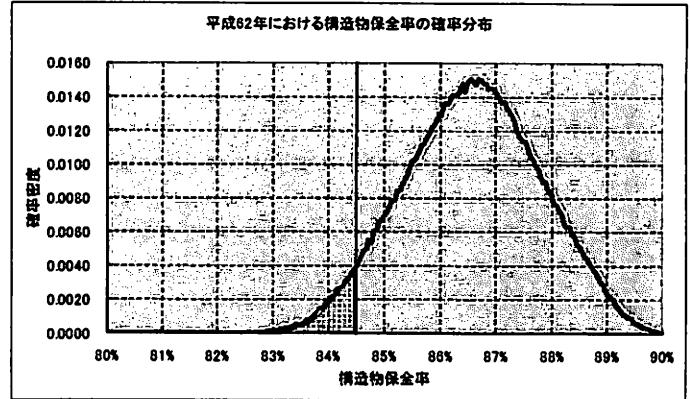
$$\pi_{ij} = \sum_{k=i}^j \prod_{m=k}^{k-1} \frac{\theta_m}{\theta_m - \theta_k} \prod_{m=k}^{j-1} \frac{\theta_m}{\theta_{m+1} - \theta_k} \exp(-\theta_k Z) \quad (4)$$

$$(j = 1, \dots, J)$$

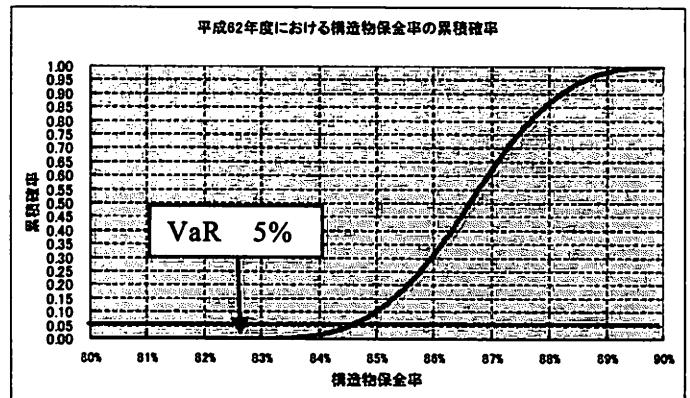
（最低ランクに健全度が推移する場合）

$$\pi_{iJ} = 1 - \sum_{j=i}^{J-1} \pi_{ij} \quad (i = 1, \dots, J-1) \quad (5)$$

ここに、 Z は点検間隔、 i は推移前の健全度、 j



a) 確率密度



b) 累積確率

図-4 構造物保全率分布の確率分布イメージ

$(j > i+1)$ は推移後の健全度である。ハザード関数の θ_i を最尤推定法により推計すれば、式(2)-(5)を用いてマルコフ推移確率行列を推定することができる。

$$\Pi(Z) = \begin{bmatrix} \pi_{11}(Z) & \cdots & \pi_{1J}(Z) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \pi_{JJ}(Z) \end{bmatrix} \quad (6)$$

相対評価モデルは多段階指指数ハザードモデルから算出した劣化をベンチマークとして、各橋梁の劣化速度がこのベンチマークからどの程度ずれているかを異質性パラメータ ε^k で表示する。

橋梁 k の劣化パラメータは、

$$\lambda_i^k(y_i) = \lambda_i(y_i) \times \varepsilon^k \quad (7)$$

と表記することができる。 ε^k が標準 Γ 分布

$$f(\varepsilon^k : \phi) = \frac{\phi^\phi}{\Gamma(\phi)} (\varepsilon^k)^{\phi-1} \exp(-\phi\varepsilon^k) \quad (8)$$

に従うと仮定すると、 ε^k は平均が1.0であり、かつ分散が $1/\phi$ となり、

$$\int_0^\infty \lambda_i^k f(\varepsilon^k, \phi) d\varepsilon = \lambda_i \int_0^\infty \varepsilon^k f(\varepsilon^k, \phi) d\varepsilon = \lambda_i$$

が成立し、ベンチマークと一致する。この ε^k の値が1より大きい場合には、ベンチマークよりも劣化速度が速いと考えることができ、逆に1より小さい場合にはベンチマークよりも劣化が遅いと考えることができる。 ε^k の値が大きいと相対的に劣化が早いと評価することができ、上位に位置する橋梁は他の橋梁と比較して、劣化が早くなる原因が存在すると解釈できる。この手法は ε^k の値で橋梁毎の相対的な劣化速度を統計的な視点から評価する手法であり、劣化が速くなる原因を詳細に分析するものではない。したがって、劣化が早くなる原因については、点検履歴を確認し、損傷写真等を精査する必要がある。

5. リスク評価に基づく財務分析

(1) リスク評価方法

リスク評価の方法として、VaR（バリュー・アット・リスク）による評価を試みる。一般的に、VaR指標は「リスクの管理手法の1つで、現在保有している資産が、一定の期間と信頼区間のもと、予想と反対の方向へ動いた場合に、絶対金額としてどの程度損失が出るかを統計的に算出する指標」と定義される。都市高速道路の場合には、負債の返済期限が設定され、かつ機構との協定によって、維持管理費用が決められる。したがって、金額で、ある発生確率の損失を評価することが困難である。ある一定の維持管理費用において、所定の管理水準をどの程度の確率で維持できるかを算出することになる。

図-4は阪神高速道路が管理する高架橋のコンクリート桁に着目し、予算3億円/年の範囲内で、健全度がA, Sになった段階で補修を行うことを繰り返す、という条件で10,000回のモンテカルロ・シミュレーションを実施したとき、償還期限である2050年の構造物保全率（式(10)）の分布を示したものである。a) は確率密度を示し、b) 累積確率を示す。VaRが5%となるのは図-4 b) の矢印の線である。この線より下側の領域は、リスクとして考慮されていない領域になる。図-4の例では、VaRが5%となるのは構造物保全率が約

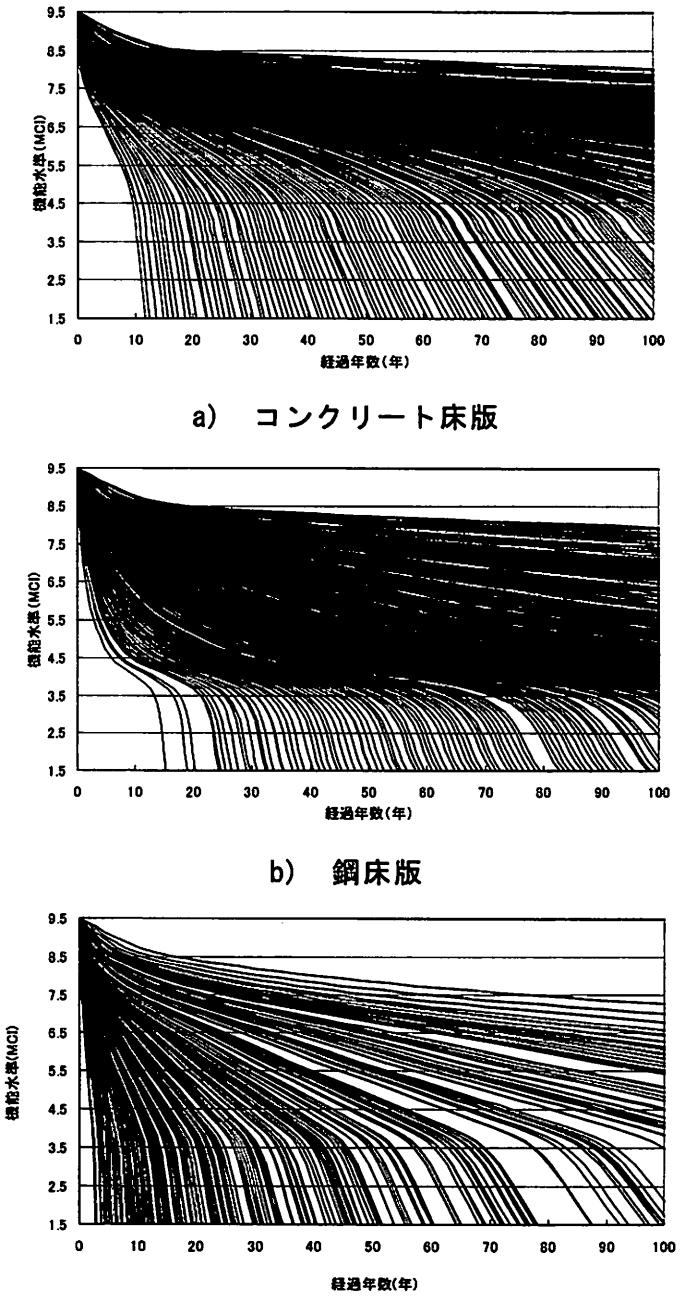


図-5 相対評価結果(舗装)

84.5%と判断することができる。このVaRの線が予定の管理水準以上になる維持管理費の推計を行う。VaRをいくらにするかについては、管理者が状況に応じて設定するものと考えられるが、一般的には5%でリスク評価が行われることが多い。

モンテカルロ・シミュレーション（試行回数：10,000回）によって、平成62年（償還期限）までの将来予測を行う。複数の補修シナリオ（例えば、複数の予算制約を設けることが考えられる）につ

	OK	C	B	A	S
OK	0.4549	0.3626	0.1559	0.0266	0
C	0	0.4658	0.4224	0.1118	0
B	0	0	0.6502	0.3498	0
A	0	0	0	0.6502	0.3498
S	0	0	0	0	1

a) 早期劣化グループ

	OK	C	B	A	S
OK	0.9653	0.0331	0.0016	3E-05	0
C	0	0.9078	0.0898	0.0024	0
B	0	0	0.949	0.051	0
A	0	0	0	0.949	0.051
S	0	0	0	0	1

b) 標準劣化グループ

図-6 確率推移行列(舗装)

いて、将来予測を行い、年次ごとの管理指標(構造物保全率)の確率分布を計算する。この計算結果に基づき、VaR評価を実施し、補修予算額と劣化リスクの整理を実施する。

(2) 財務分析方法

維持管理費は会計上の仕訳として、資産形成に寄与する「資本的支出」と、資産形成には寄与しないが、費用として発生する「収益的費用」に分類することができる。都市高速道路の維持管理を実施するにあたっては、「収益的支出」に該当する補修については、通行料金収入から調達することが可能であるが、「資本的支出」は通行料金からの調達が不可能であり、別途借り入れなどの方法で自主調達しなければならない。新たに発生した借金は期末に一括して機構に引き渡されるため、機構の債務が増加する。したがって、「収益的支出」「資本的支出」が今後どのように推移するかを把握することは財務上非常に重要である。本研究における財務分析は、この2種類の費用の長期的推移過程を追跡することを目的とする。

6. 数値計算事例

(1) 重点課題の抽出

a) 計算条件

阪神高速道路の保全情報管理システムに収録されている最新の目視点検データを用いて相対評価を実施した。データは「舗装」、「塗装」等工種ごとに径間や脚単位で記録されており、「舗装」は更に車線毎にも分割されている。データの記録単位を相対評価の計算単位として、径間や脚ごとに劣化曲線を描き、相対的な劣化速度の違いを評価する。

b) 計算結果

図-5に舗装に関する相対評価結果を示す。舗装は表層基層の下の構造によって、劣化速度に系統的な違いがみられる。したがって、表基層より下の構造ごとに相対評価を実施した。全ての構造で劣化が大きくばらついているが、土工部はMCI (Maintenance Control Index) が1.5に到達するまでの期間が他の構造よりも速くなっている。鋼床版部はコンクリート床版部と比較して、MCIが1.5に到達するまでの時間が長くなるが、MCIが9.5付近から4.5付近までは劣化速度が速い傾向がみられる。

劣化速度が速い上位5%を早期劣化グループとして一次抽出し、点検履歴や損傷写真を精査する。このなかから、真に劣化が早い箇所を抽出し、劣化が早い原因を追求する。このなかで、全社的な課題をみつけだし、重点課題として取り組むことが考えられる。

(2) リスク評価

a) 想定シナリオ

本研究では、阪神高速道路が管理する約234kmの高架橋を対象とする。まず保全情報管理システムに収録されている定期点検データを用いて、構造物の劣化予測を行う。次に、将来に発生する維持管理費用予測を行い、その結果を用いて財務分析を実施する。将来予測については、構造物の劣化過程に不確実性が存在するものとして、確率モデルによる劣化予測モデルを用いる。モンテカルロ・シミュレーションにより、2009年（平成21年）から2050年（平成62年）までの維持管理費を推計する。工種毎に毎年の予算制約額を設定する。予算制約下で維持管理費を推計し、償還期限の平成62年に所定の管理水準を90%, 95%, 99%の確率で実現できる費用を算出

する。

b) 計算条件の設定

①対象工種

舗装、塗装、伸縮継手、コンクリート桁、鋼桁、コンクリート脚、床版、支承の8工種を対象とする。

②対象とするリスク

劣化の不確実性をリスクと考える。

③劣化予測モデル

確率推移行列を劣化モデルとして採用し、構造要因ごとに相対評価を実施する。相対評価結果より劣化が早い上位 5%を「早期劣化グループ」、それ以外を「標準劣化グループ」に分類後、グループ毎に劣化モデルを作成する。図-6は塗装を事例に「早期劣化グループ」、「標準劣化グループ」として分類後の確率推移行列の計算例を示している。

④管理指標

舗装は舗装保全率を管理水準とする。その他構造物は構造物保全率を管理水準とする。

$$\text{舗装保全率}(\%) = \frac{\text{MCI} \geq 4.0 \text{ の延長(km)}}{\text{管理延長(km)}} \quad (9)$$

構造物保全率(%)

$$= 1 - \frac{\text{A, S損傷がある径間(脚)数}}{\text{全径間(脚)数}} \quad (10)$$

⑤補修実施時期

補修の実施時期については、本来LCC（ライフサイクルコスト）を最小にする補修時期と補修工法を与える最適管理水準で補修すべきである。H-BMS ver2.0では、LCCによる最適管理水準を算出しており、部材によっては現在補修対象ではない判定ランクBが最適管理水準のものもある。

しかし、現状では、判定ランクがA, Sで補修が行われ、Bで補修が実施されることはない。また、将来予測計算において、予算制約を考慮した場合には、健全度が低い箇所が優先的に補修されるため、最適管理水準での補修は結果的に見送られることになり、最適管理水準が計算上考慮されないことが多い。従って、本研究では、

表-4 VaR が 5%の場合の推計結果

工種	最新点検時 管理水準	2050年の予測 管理水準 (90%信頼域)	予算制約額 (億円/年)	平均支出額 (億円/年)
舗装	99.49%	100.00%	修繕予算 4.50	修繕費 4.33 維持費 3.42
塗装	98.26%	98.90%	16.90	14.23
伸縮継手	94.73%	95.80%	19.40	19.38
Co桁	87.49%	88.30%	3.90	3.86
鋼桁	98.57%	99.50%	0.90	0.82
Co脚	95.82%	98.00%	3.40	3.38
床版	99.72%	100.00%	0.40	0.31
支承	96.72%	98.00%	1.90	1.84

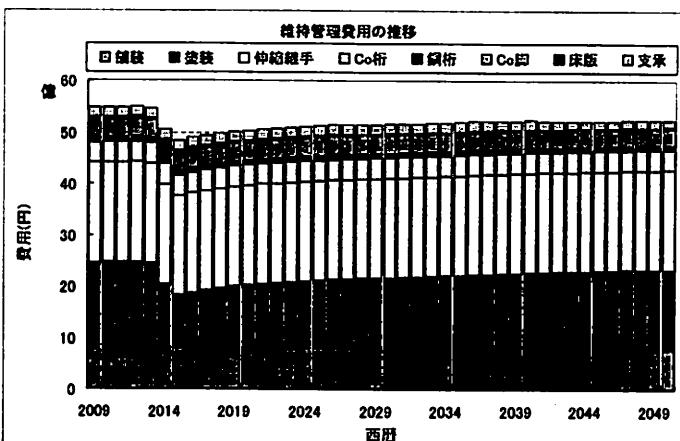


図-7 VaR が 5%の場合の費用の推移

予算制約を考慮した将来予測を行うことを前提として、最適管理水準での補修実施ではなく、現況の維持管理業務での補修実施時期であるA, Sで補修を実施することとする。

⑥補修方法

補修方法は①で示した工種ごとに設定する。舗装は打ち替え補修を基本とする。ポットホール等の維持費用は、舗装の健全度に応じて設定した。塗装については塗替え塗装を考慮する。コンクリート構造物はひび割れ注入、表面防護等一般的な補修方法を設定した。試算では、同じ補修を繰り返すことにより、半永久的に工種ごとの管理水準を維持できると仮定する。

⑦予算制約の考え方

本研究では、①で示した工種ごとに予算制約を与えることとする。予算は0.1億円/年きざみで設定し、所定の管理水準を維持できる予算制約を必要予算と考える。予測計算におけるある年次にA, Sを補修してもなお、予算が余っている場合には、予算を使い切らないこととする。また、

表-5 VaR が 1% の場合の推計結果

工種	最新点検時 管理水準	2050年の予測 管理水準 (99%信頼域)	予算制約額 (億円/年)	平均支出額 (億円/年)
舗装	99.49%	100.00%	4.50	修繕費 4.33 維持費 3.42
塗装	98.26%	98.50%	18.80	14.32
伸縮継手	94.73%	95.60%	19.50	19.48
Co桁	87.49%	88.90%	4.00	3.96
鋼桁	98.57%	99.50%	0.90	0.82
Co脚	95.82%	99.60%	3.50	3.41
床版	99.72%	100.00%	0.40	0.31
支承	96.72%	98.00%	2.00	1.85

表-6 VaR が 10% の場合の推計結果

工種	最新点検時 管理水準	2050年の予測 管理水準 (90%信頼域)	予算制約額 (億円/年)	平均支出額 (億円/年)
舗装	99.49%	100.00%	4.50	修繕費 4.33 維持費 3.42
塗装	98.26%	98.90%	16.90	14.23
伸縮継手	94.73%	95.80%	19.40	19.38
Co桁	87.49%	88.30%	3.90	3.86
鋼桁	98.57%	99.50%	0.90	0.82
Co脚	95.82%	98.00%	3.40	3.38
床版	99.72%	100.00%	0.40	0.31
支承	96.72%	98.00%	1.90	1.84

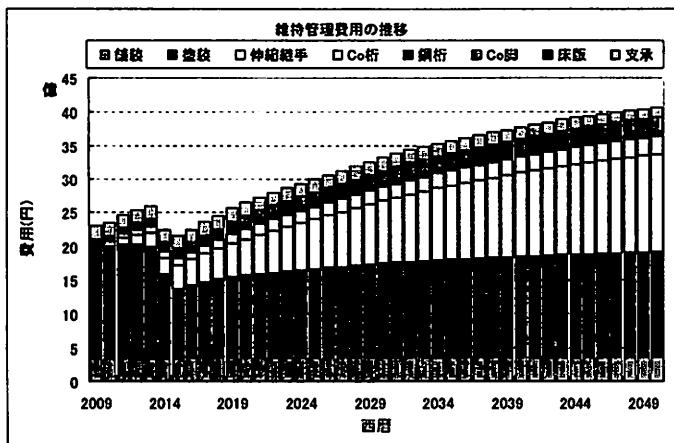


図-8 維持管理費(収益的支出)の推移

舗装の予算については打ち替え等の修繕に予算制約をかけることとし、維持費用は予算制約ごとに算出される舗装の健全度に応じて発生することとした。

c) 計算結果

リスク評価に基づく将来予測結果を表-4から表-6に示す。表-4はVaRが5%，つまり95%の確率で所定の管理水準を維持することができる場合の毎年の予算枠と、推計された毎年の補修費用を示す。同様に表-5はVaRが1%，表-6はVaRが10%の結果を示す。VaRが5%の表-4のケースに限って、図-7に費用の推移を示す。表-4から表-5の「最新点検時管理水準」は直近の点検結果に基づく管理水準の値を示す。「予算制約額」は2009年から2050年の42年間で、1年間に使える予算の上限を示し、「平均支出額」は42年間のシミュレーションの中で支出した費用の年平均額を示す。年度によって、A,Sを補修しても予算が余っている年があるため、予算の上限とシミュレーションでの支出額が一致しない。表の中央の

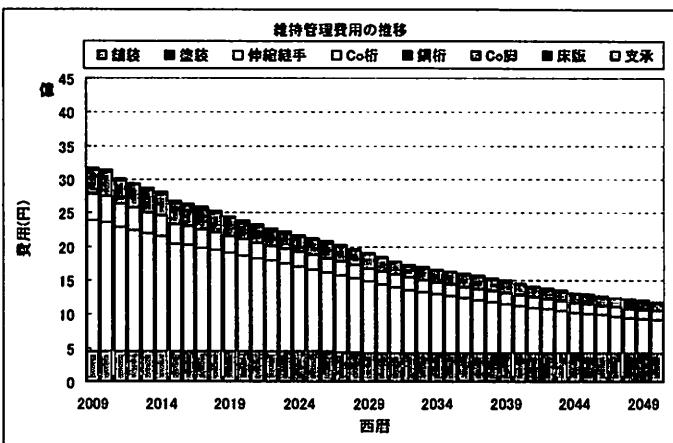


図-9 修繕費(資本的支出)の推移

セルには、上記の費用を支出した場合の2050年の債務返済期限における予測管理水準を示す。劣化リスクを考慮しているため、表-4の場合には、95%の確率で実現する管理水準を示している。図-7をみると、毎年51.8億円の支出がなされている。2014年付近で支出額の落ち込みがみられるが、これは塗装の支出額の落ち込みによるものである。塗装は2009年から2014年の間で、劣化した箇所を補修してしまい、2014年ころには予算制約額上限まで費用の支出がないからである。その後は次第にAランク判定箇所が増加するため、補修費用も増加する。

劣化リスクを厳格に評価してVaRを1%とした場合、必要な費用は5%とした時より、0.1億円/年、10%としたときより0.3億円/年多くなる。安全性を最優先に考え、通常の維持管理のなかで劣化リスクを1%に抑えたいという立場にたてば、51.9億円/年が必要である。劣化リスクを5%まで許せば、51.6億円/年の費用を見込めばよい。

試算によると、リスクの変動が維持管理費用に

与える影響が小さい結果となった。これは、補修により機能がOKまで回復し、同じ補修を繰り返せば管理水準を半永久的に維持できると仮定したために、劣化リスクが限定的になったと考えられる。

図-8と図-9は、図-7で示した費用を収益的支出である「維持管理費」と資本的支出である「修繕費」の費用の推移を示す。計算開始からしばらくは、仕様の変更を伴う補修が多く、資本的費用である「修繕費」に仕訳されるために、修繕費が多く支出される。時間の経過とともに、1回目の補修数が減少するために、「修繕費」は時間が経つにつれて減少していく。一方、「維持管理費」は当初支出額が少ないが、時間の経過とともに過去に仕様の変更を伴う保守が完了し、2回目以降の補修が実施されるため、増加していく。

以上のことから、2009年からしばらくは「修繕費」の支出が多いために、自主調達による借入が増加することが予想されるが、時間の経過とともに次第に減少していく。一方、「維持管理費」は「修繕費」とは逆に、時間の経過とともに増加する。これは、2回目以降の補修が、1回目と同じ仕様の補修を実施することから、収益的支出として仕分けされるからである。「維持管理費」は通行料金を原資とするため、「維持管理費」の増加が他の事業費用に影響を与える可能性が考えられる。

7. おわりに

本研究では、阪神高速道路を事例として、都市高速道路のアセットマネジメントのうち、リスク評価に基づく財務分析について検討を行った。検討に際して、リスクマネジメントの枠組みに基づいて業務プロセスシステムを整理し、H-BMSが業務プロセスシステムのなかでどのような位置づけがされ、どのような役割を果たすべきかを議論した。そして、リスク評価を行い、将来の維持管理費用を推計し、財務分析を実施した。

その結果、劣化リスクと財務分析結果を関連付けることが可能になった。

試算からは、劣化リスクは道路会社全体の各年

度における経営リスクに大きな影響を与えていない結果となった。しかし、保全業務が適切に執行されるかどうかは、道路会社の長期的な経営リスクに多大な影響を及ぼす。また、保全業務において、維持管理シナリオと経営リスクが対応づけられれば、道路会社の経営者層が経営方針を策定するための有益な情報となる。特に、採用する維持管理シナリオがどの程度のリスクを有しているかを定量的に把握することが可能となる。本研究で実施したリスク評価と財務分析では、いくつかの前提条件を仮定している。今後、リスク評価と財務分析の精度を向上させるためには、解決すべき課題が残っており、以下に整理する。

まず、1) 試算では高架橋の維持管理に割り当てられた予算は全て補修に使用できると仮定した。実際の維持管理では、予定していた補修以外に、突発的な補修が発生するなど予定外の出費があり、割り当てられた予算全てを補修に使えない可能性が考えられる。その場合、本試算で設定した費用では所定の管理水準を維持できない可能性がある。2) リスク評価や財務分析を実施するにあたって、多くの前提条件を設定している。リスク評価を行う際にどの条件が結果に与える影響が大きいかを検討するために、パラメータ解析による感度分析を実施する必要がある。また、3) 本研究のリスク評価に基づいた将来予測の考え方は、管理水準を維持するためには必要な費用を算出している。実際に維持管理を実施し、その実施状況を適切に管理していくためには管理会計の構築が必要と考えられる。維持管理に係る会計手法には、資産の減耗の考え方によって、いくつかの会計手法^{10),11)}が考えられるが、本研究の計算方法は「線延維持補修会計」原則に基づいた管理会計を構築することが可能となる。最後に、本研究で示した数値計算事例は多くの仮定に基づいた試算であり、本数値計算事例は都市高速道路のアセットマネジメントを実施するうえで、1つの流れを示すためのものであることを断わっておく。

【謝辞】本研究は阪神高速道路株式会社の技術

審議会道路資産管理システム分科会での審議を踏まえている。審議にあたり、貴重なご指導・ご助言をいただいている主査の関西大学大学院古田均教授と委員の神戸大学大学院森川英典教授に深く感謝の意を表します。また、相対評価モデルの適用にあたっては、青木一也氏（パスク）から多くの示唆を受けている。

【参考文献】

- 1) 坂井康人, 荒川貴之, 井上裕司, 小林潔司 : 阪神高速道路橋梁マネジメントシステムの開発, 土木情報利用技術論文集, 土木学会, Vol.17, pp.63-70, 2008.
- 2) 坂井康人, 井上裕司, 小林潔司 : 都市高速道路の舗装修繕における同時施工の有効性検証, 建設マネジメント研究論文集, 土木学会, Vol.15, pp.159-168, 2008.
- 3) 坂井康人, 上塙晴彦, 小林潔司 : ロジックモデル (HELM) に基づく高速道路維持管理業務のリスク適正化, 建設マネジメント研究論文集, 土木学会, Vol.14, pp.125-134, 2007.
- 4) 吉川吉衛 : 企業リスクマネジメント, 中央経済社, 2007.
- 5) リスク管理・内部統制に関する研究会 : リスク新時代の内部統制～リスクマネジメントと一体となって機能する内部統制の指針～, 2003.
- 6) 高速道路機構ファクトブック, 2007.
- 7) 阪神高速道路株式会社 : 道路構造物の点検要領 共通編, 土木構造物編, 2005.
- 8) 小濱健吾, 岡田貢一, 貝戸清之, 小林潔司 : 劣化ハザード率評価とベンチマー킹, 土木学会論文集 A, Vol.64, No. 4, pp.857-874, 2008.
- 9) 津田尚胤, 貝戸清之, 青木一也, 小林潔司 : 橋梁劣化予測のためのマルコフ推移確率の推定, 土木学会論文集, No.801/I -73, pp.68-82, 2005.
- 10) 慶道充, 江尻良, 織田澤利守, 小林潔司 : 道路舗装管理会計アプリケーション, 土木情報利用技術論文集, 土木学会, Vol.13, pp.125-135, 2004.
- 11) 江尻良, 西口志浩, 小林潔司 : インフラストラクチャ会計の課題と展望, 土木学会論文集, No.770/VI-64, pp.15-32, 2004.

Urban Highway Asset Management - Risk Evaluation and Financial Analysis -

By Yasuhito SAKAI, Mitsuru JIDO, Kiyoyuki KAITO and Kiyoshi KOBAYASHI

Hanshin Expressway Public Corporation had been privatized in 2005 and has responsibility for maintaining service level of civil structures at sound condition and completely paying off its debt within 45 years after privatization. Therefore, it is an important issue to establish maintenance and rehabilitation plan considering the payment of the debt. This study addresses on Hanshin Expressway asset management system considering internal control and risk management system. Concretely, first of all, business process of Hanshin Expressway is constructed in terms of internal control and risk management. On the other hand, uncertainty of deterioration process is treated as risk, and the relationship between this deterioration risk and maintenance/rehabilitation cost is verified. Based on the risk evaluation result, this study tries to calculate financial information which can be used to making debt payment plan. Finally, for continuous improvement of the business process, extraction of the high priority monitored structures is discussed based on relative evaluation method of deterioration rate of each structure using bench-marking analysis.