技術展望

阪神高速道路の維持管理の現状と課題

CURRENT SITUATION AND CHALLENGES OF MAINTENANCE ACTIVITIES OF URBAN EXPRESSWAY

中林 正司¹・西岡 敬治²・小林 潔司³

Masashi NAKABAYASHI, Takaharu NISHIOKA and Kiyoshi KOBAYASHI

¹ 正会員 阪神高速道路株式会社 執行役員 (〒541-0056 大阪市中央区久太郎町 4-1-3)

E-mail: masashi-nakabayashi@hanshin-exp.co.jp

² 正会員 阪神高速技術株式会社 維持事業部長 (〒541-0054 大阪市中央区南本町 4-5-7)

E-mail: takaharu-nishioka@hex-eng.co.jp

³ フェロー会員 京都大学経営管理大学院 経営管理講座 (〒606-8501 京都市吉田本町)

E-mail: kkoba@psa.mbox.media.kyoto-u.ac.jp

Key Words : Hanshin Expressway, operation and maintenance, H-BMS, logic model

阪神高速道路は昭和 39 年に環状線の一部 2.3 km を供用して以来、約 40 年後の今日では総延長 233.8 km のネットワークを形成し、1 日平均約 90 万台の利用台数を数える。阪神都市圏を支える最も重要なインフラの一つであるため、その維持管理水準は高いものが求められる。旧阪神高速道路公団では従前より維持管理の合理化に取り組んでおり、一定の成果を上げていたところであるが、平成 15 年には民営化に向けて管理費について 3 割縮減と数値目標が示され、さらに、一層の合理化を求められた。本稿では、このような維持管理費の縮減による現状における影響を検証するとともに、中長期的に最適な維持管理計画の策定を支援するために開発した橋梁マネジメントシステム (H-BMS) と、さらに、維持管理業務の継続的改善に資するために開発したロジックモデル (HELM) について述べるものである。

1. はじめに

阪神高速道路は、環状線の一部を構成する土佐堀～湊町間 2.3 km の供用を昭和 39 年に開始した。それ以来、図-1 に示すように、大阪・神戸両都心部を中心に整備が進められてきた。その間、関西都市圏の慢性的な渋滞解消と都市活動や市民生活を支える基幹道路としての重責を果たしてきた。

昭和 39 年から昭和 45 年に至る期間では、昭和 45 年の大阪万国博覧会の開催を目標として、主として大阪環状線の整備を中心として道路整備が進められた。その後、昭和 60 年に至るまでの期間では、放射路線の整備、大阪～神戸との連絡道などが整備され、この時期に阪神高速道路の骨格が形成されたと考えてよい。さらに、平成期に入ると、湾岸線や北神戸線などが整備されるなど、高速道路網としての充実が図られた。その結果、現在、阪神高速道路の供用延長は 233.8 km、1 日平均の利用台数は約 90 万台となっている。また、図-2 に示すように、道路延長は阪神都市圏の中で 5.7% であるのに対し、交通量では 15.4%、貨物輸送量では 47.3% を占めており、自動車専用道路として重要な役割を演じている。

このように、阪神都市圏の道路網において中核的な役割を演じている阪神高速道路であるが、昭和 39 年の

図-1 供用路線の拡がり

供用開始以来、すでに 40 年以上が経過している。図-1 に示したように、高度経済成長期に建設された環状線を中心として、施設の維持補修に対するニーズは着実に増加している。その中で、維持修繕費は平成 5 年度を境に縮減傾向に移行した。さらに、平成 15 年 12 月の道路関係四公団の民営化に関する政府・与党申し合わせにより、「管理費については、平成 17 年度までに 3 割のコスト縮減を図る」こととされたのを踏まえ、大幅な維持修繕費の削減に踏み切った。

本稿では、阪神高速道路における維持管理の現状と

図-2 阪神高速道路の機能

課題について述べるとともに、平成15年度以降における維持修繕費の削減が、施設のサービス水準に及ぼした影響について概括する。その上で、阪神高速道路が、維持修繕業務の高度化を目指して現在取り組んでいる試みについて報告する。以下、2.では阪神高速道路の維持管理の現状について概括する。ついで、3.では、昨今の維持修繕費用の縮減が、高速道路のサービス水準に及ぼした影響について考察する。さらに、阪神高速道路における管理手法の構築に向けての取組みとして、4.では、橋梁マネジメントシステム（H-BMS: Hanshin expressway Bridge Management System）^{1),2)}について紹介し、5.では、維持修繕業務の合理化を目指して、維持管理業務の目標、手段をHELM（Hanshin Expressway Logic Model）として体系化し、リスクマネジメントの立場から管理水準を設定する試みについて報告する。

2. 阪神高速道路の維持管理の現状

表-1に示すように、橋梁構造が阪神高速道路の構造種別総延長のうち86%を占めている。これは、都市高速道路の特徴として、都市内においては高速道路用地の取得が容易でなく、既存の街路や水路等の上空を利用した連続高架橋が中心になっているためである。その結果、土工区間が占める割合が多い都市間高速道路に比べ、都市高速道路の単位距離当たりの維持管理費が高くなることとなる。次に、都市高速道路の第2の特徴として、表-2に示すように多種多様の構造物および施設を維持管理していることがあげられる。さらに、近年供用した路線や今後供用が予定されている路線では、環境問題へ対応するために換気所を有する地下構造が増える傾向にある。このことも、将来の維持管理費を逼迫させる原因となることが予想されている。

表-1 阪神高速道路の構造種別（平成18年4月現在）

地 区	橋梁区間			土工区間	トンネル区間	合 計
	鋼 桁	コンクリート桁	小 計			
大阪地区	(48.2%) 112.7	(11.9%) 27.8	(60.1%) 140.5	(0.7%) 1.6	(0.3%) 0.7	(61.1%) 142.8
兵庫地区	(20.3%) 47.4	(5.6%) 13.1	(25.9%) 60.5	(8.0%) 18.6	(5.1%) 11.9	(38.9%) 91.0
合 計	(68.5%) 160.1	(17.5%) 40.9	(86.0%) 201.0	(8.6%) 20.2	(5.4%) 12.6	(100.0%) 233.8

表-2 阪神高速道路の構造物および施設（平成18年4月現在）

種別	単位	大阪地区	兵庫地区	合計	備考
営業延長	km	142.8	91.0	233.8	
入路	箇所	108	64	172	
出路	箇所	110	65	175	
橋脚	基	6300	2381	8681	
橋桁	径間	6972	2587	9559	
塗装面積	千 m ²	7559	3388	10947	内面は含まず
舗装面積	千 m ²	3044	2041	5085	
非常駐車帯	箇所	220	179	399	仮設非常駐車帯を含む
パーキング	箇所	8 (3)	7 (1)	15 (4)	所とし、その内（ ）はミニパーキング
非常口	箇所	127	50	177	ランプは含まず
標識	枚	6577	3196	9773	案内・規則・警戒
道路照明灯	灯	16469	15410	31879	
道路情報板	基	303	157	460	
交通管制テレビ	基	160	142	302	
図形情報板	基	6	0	6	
所要時間表示板	基	133	41	174	外付の面数のみ
非常電話	箇所	648	701	1349	
道路情報ラジオ	箇所	24	8	32	
料金所	箇所	83	50	133	乗継所(6)含まず

表-3 阪神高速道路の経年別供用延長

供用年数	供用延長 (km)			累計比率 (%)
	大阪地区	兵庫地区	合 計	
0年以上 5年未満	0	12.6	12.6	100.0
5年以上 10年未満	8.0	13.2	21.2	94.6
10年以上 15年未満	31.2	16.0	47.2	85.5
15年以上 20年未満	12.1	11.4	23.5	65.4
20年以上 25年未満	13.5	12.5	26.0	55.3
25年以上 30年未満	12.4	0	12.4	44.2
30年以上	65.6	25.3	90.9	38.9
合 計	142.8	91.0	233.8	—

また、構造物の高齢化も維持管理の上で重要な課題である。表-3は、阪神高速道路の経年別供用延長を示しているが、現在供用後20年以上の構造物が全体の55%以上、30年以上の構造物も40%近く占めている。最近になり、鋼橋の鋼床版等の一部に亀裂が発生するような損傷事例が現れるようになってきた。図-3に示

図-3 鋼床版の亀裂損傷

図-4 維持修繕費の推移

ように、亀裂は主としてデッキプレートと縦リブおよび横リブの溶接部などに発生している。亀裂による損傷は、金属疲労が原因であると考えられており、今後大型車交通の多い路線や、供用後経過年数が多い路線を中心として、亀裂の発生は避けられないと考える。

一方、構造物の維持管理費は縮減傾向にある。図-4は阪神高速道路の維持管理費の推移を示しているが、平成5年度をピークとして、それ以降は減少し続けている。特に、1kmあたりの維持修繕費(維持修繕費/供用延長)で比較すると、平成5年度が1億7千万円であったのに対し、平成17年度は7千5百万円であり、ピーク時の44%程度にまで減少している。この水準は、昭和50年代前半と同じであるが、当時の供用後の平均経過年数は8年程度であり、構造物の老朽化が進展した現状とは大きな違いがある。

このような厳しい条件下で多種多様の構造物かつ交

図-5 平成17年度維持修繕費とその内訳

通量の多いネットワークを保全していくために阪神高速道路では管理手法の合理化や新技術の導入などに取り組んでいる。

3. 維持修繕費縮減の影響検証

前述のとおり、維持修繕費は平成5年度を境に縮減傾向にある。さらに、平成15年12月の政府・与党申し合わせにより、「管理費については、平成17年度までに3割のコスト縮減を図る」こととされた³⁾のを踏まえ、維持管理費用の削減計画を作成し、コスト縮減を行った。縮減メニューとしては、清掃頻度の見直し、電気、機械設備に関する点検手法⁴⁾並びに頻度の見直し、簡易鋼製伸縮継手など新技術・新材料の採用による長寿命化、工区統合など契約方法の見直しなどがあげられる。その結果、平成17年度の維持修繕費は167億円(税抜き)となり、その内訳は図-5に示すようになる。これは、新規供用された路線の維持修繕費を除外すれば、平成14年度比で34.5%減となる。以下では、維持修繕費を縮減したことがもたらした影響について検討しよう。

(1) 路面清掃

平成17年度の路面清掃頻度は、平成14年度比で4割程度まで低減した(15回/月→6回/月)。その結果、不具合事象(飛び石による事故件数、落下物による事故件数)はそれぞれ55%、73%増加した。このことから、清掃頻度の減少が安全性に悪影響を及ぼした可能性があり、清掃頻度の見直しが必要である。

(2) 日常点検および維持工事

路上および路下点検の頻度を、平成14年度に比べ概ね6割程度の水準に減少させた(5回/週→3回/週)。しかし、補修率(補修数量/損傷発見数量)は低下し

ておらず、全般的には安全確保のため必要な管理は実施していると言える。ただし、年間 S ランク 轍掘れ滞留量（単位延長当たり何件の轍掘れが存置されているかを表した指標、年間 S ランクとは走行安全性に支障があり緊急補修が必要なものを意味する）、轍掘れ発見件数（（件／年・km）／日常点検頻度（回／年））は増加しており、点検頻度の低減により損傷発見までに放置される時間は延びていると考えられ、交通事故リスクは増加している可能性がある。

(3) 設備（道路照明）の保守

設備の機能低下を計測機器により確認することを主とした定期点検方式を設備の動作確認を主とした機能点検方式に移行するなど、点検方式を簡素化した。その結果、道路照明の点灯率（点灯時における全照明中の点灯している照明の割合）が 99.1% から 98.3% へとわずかに低下しているものの、全般的には良好な水準が維持されている。しかし、機能点検方式では発見できない損傷が潜在化している可能性があるため、今後とも継続して監視する必要がある。

(4) 舗装補修

従来から計画的・集中的に舗装の打換えを実施してきたので、現在のところ道路保全率（当社では MCI > 4 が確保できる延長の割合）は、ほぼ 100% 確保されている。しかし、平成 17 年度の予算規模では、補修率は総延長の 2.6% に止まっている。今後、この補修率を維持した場合、舗装の補修サイクル期間長は 38 年となり、舗装のサービス水準を持続的に維持できないことは明らかである。したがって、今後は合理的な維持管理計画を立案するとともに、舗装材料の長寿命化に関する検討が必要である。

(5) 塗装塗替え

平成 17 年度の補修数量は 53 000 m² で、平成 14 年度に比べ 7 割近くまで減少している。これは塗替え方法を、全面塗替えから部分塗替えに変更したことによるが、塗装塗替えは健全性への影響が短期的には顕在化しにくいので、塗装の塗り替えを先送りしたにすぎない可能性がある。したがって、今後は長期的な視点に立った塗装塗替え計画や高耐久性の塗装材料の検討が必要である。

(6) 構造物補修

構造物補修に要した費用は平成 14 年度約 46 億円に対し、平成 17 年度は約 36 億円と約 10 億円縮減した。この主な縮減メニューは工区統合によるものであり、補修率は低下していない。しかし、今後構造物の老朽化

図-6 供用年別補修数量

に伴い、損傷数量の増加が予想される。図-6 は構造物の供用後の経年数別の要補修数量を示しているが、いずれの点検においても供用後年数が長くなるに従い、要補修数量も増加する様相を示している。とりわけ、伸縮継手部を有する梁上点検での補修数量の増加は著しい。この補修数量の増加への対応が今後の大きな課題である。

以上のように現在のところでは、維持修繕費 3 割縮減による影響はそれほど深刻ではない。しかし、問題を先送りしている懸念があるため、今後とも注意深く見守っていく必要があると考えている。

4. 橋梁マネジメントシステムの構築

前述のように、阪神高速道路の維持管理を取り巻く状況は非常に厳しいものがある。このような状況下で維持管理業務の効率化・高度化を達成するために、本稿では橋梁マネジメントシステム（H-BMS）と、ロジックモデル（HELM）をとりあげ、現在取り組んでいる研究内容を紹介する。

(1) H-BMS の概要^{1),2)}

近年、橋梁の健全度判定や診断の結果から、劣化過程をモデル化し、限られた予算内でライフサイクル費用を最小にすることができると言われるような補修・補強工法や優先順位を決定するための橋梁マネジメントシステム（BMS: Bridge Management System）が構築されている⁵⁾⁻⁹⁾。BMS では、橋梁部材の劣化予測が重要となるが、劣化過程をマルコフ推移確率で表現する方法がよく用いられる。さらに、マルコフ決定モデルを用いて土木構造物の最適補修戦略を求める方法も数多く提案されている¹⁰⁾⁻¹²⁾。また、BMS ではライフサイクル費用を評価することが必要となるが、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) 割引率を用いずに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¹³⁾。割引現在価値法は、既往の最適補修モデル

図-7 H-BMS を用いた維持管理手順

や米国の代表的な BMS である PONTIS¹⁴⁾ においても採用されている。

阪神高速道路では、維持管理計画を合理的・効率的に立案するための橋梁マネジメントシステム（H-BMS：Hanshin expressway Bridge Management System）の構築に向けて積極的に取り組んでいる。H-BMS は、阪神高速道路がこれまでに蓄積してきた豊富な点検データに基づいて、多段階指数ハザードモデル¹⁵⁾を用いてマルコフ推移確率を推計することにより、現実の劣化過程に関する情報を劣化予測に反映させることが可能である。さらに、多段階指数ハザードモデルを用いることにより、構造種別、路線別の劣化曲線を推計することが可能である。ライフサイクル費用評価にあたっては、割引現在価値法を用いている。さらに、各年の予算制約を考慮して、構造物の補修・劣化過程をシミュレートするメカニズムを有している。

(2) H-BMS の目的

阪神高速道路が開発中の H-BMS は、

- i) 構造物を適切な水準に長期的に維持するために必要な費用の算出
- ii) 長期的な機能水準や費用の推移、補修の優先順位などを算出し、維持管理計画を立案するための参考資料の提供
- iii) 適切な補修計画および補修費用の根拠を明確にし、説明責任を果たす

ことなどを目的としている。H-BMS では阪神高速道路が公団時代から所有、運用している保全情報管理システム（構造物の資産、点検、補修に関するデータベースシステム）に蓄積されたデータを用いて、構造物の状態把握および劣化予測を行い、機能を継続的に維持するための維持修繕費の必要額と維持補修の優先順位を算出し、予算計画、補修計画を立案する。さらに、実際に実施した維持補修の事後評価、資産情報の更新を行うことにより、維持補修方針のレビューおよび見直

しを行うものである。以上の H-BMS を活用した維持管理手順は図-7 に示すように模式化できる。

(3) システム内容

H-BMS は、構造物の劣化に対する維持管理計画の立案を目的としており、舗装、塗装、伸縮継手、床版、鋼構造物、コンクリート構造物を対象工種（部位）としてとりあげ、これらの工種ごとに維持管理計画が策定できる。H-BMS の構築にあたっては、維持管理予算のシェアが高く、劣化メカニズムが単純な工種から逐次システムの導入を行っている。以下では、システムが最も充実している舗装を事例として紹介する。

阪神高速道路では、現在自動計測車を用いて舗装状態を表すデータとして径間・車線ごとのひび割れ率、平均轍掘れ量、縦断凹凸量等を収集している。そこで、舗装の健全度指標としては、以下に示す式から計算される MCI を用いている¹⁶⁾。

$$MCI = 10 - 1.51C^{0.3} - 0.3D^{0.7} \quad (1)$$

ここに、 C はひび割れ率（%）、 D は轍掘れ量（mm）を表す。この際、出来形管理における不陸の許容値を勘案し、舗装補修時には、ひび割れ率 0%、轍掘れ量 2.0 mm として $MCI = 9.5$ に戻ると設定している。

阪神高速道路では、蓄積された舗装劣化過程に関するデータを用いて統計的劣化モデルを作成するとともに、劣化モデルにより将来の舗装の劣化予測を試みている。劣化過程には不確実性が存在することより、劣化過程をマルコフ推移確率を用いて表現している。点検間隔の異なる複数の時点のデータが混在する状況でも精度よくマルコフ推移確率を推定できるように、多段階指数ハザードモデル¹⁵⁾を用いてマルコフ推移確率を推定している。すなわち、点検データに基づいて多段階指数ハザードモデルのパラメータを最尤推定法により推計し、その結果に基づいてマルコフ推移確率行列を解析的に導出する。さらに、マルコフ推移確率行列を用いて、平均的な劣化曲線を推定している。その結果、舗装の健全度に応じて劣化速度が変化する状況を再現することができ、理論的な考え方との整合性を取りやすくなる。さらに、劣化進展のメカニズムが異なる区間や路線ごとにマルコフ推移確率行列を推定できるため、劣化曲線をきめ細かに設定することが可能になった。多段階指数ハザードモデルの推計にあたっては、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数ハザードモデル

$$\lambda_i(y_i) = \theta_i \quad (2)$$

を推計した。ただし、 i は部材の健全度、 λ_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. マルコフ推移確率を用いる場合, 健全度を離散値として表現することが必要となる. 舗装の場合, 連続値である MCI をデータの存在する $5.0 < \text{MCI} \leq 10.0$ の範囲で 1.0 刻みに分類し, その中央値を健全度の代表値とした.

多段階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)

$$\pi_{ii} = \exp(-\theta_i Z) \quad (3)$$

(1 ランク健全度が推移する場合)

$$\pi_{ii+1} = \frac{\theta_i}{\theta_i - \theta_{i+1}} \{-\exp(-\theta_i Z) + \exp(-\theta_{i+1} Z)\} \quad (4)$$

(2 ランク以上健全度が推移する場合)

$$\pi_{ij} = \sum_{k=i}^j \prod_{m=i}^{k-1} \frac{\theta_m}{\theta_m - \theta_k} \prod_{m=k}^{j-1} \frac{\theta_m}{\theta_{m+1} - \theta_k} \exp(-\theta_k Z) \quad (j = 1, \dots, J) \quad (5)$$

(最低ランクに健全度が推移する場合)

$$\pi_{iJ} = 1 - \sum_{j=i}^{J-1} \pi_{ij} \quad (i = 1, \dots, J-1) \quad (6)$$

ここに, Z は点検間隔, i は推移前の健全度, j ($j > i+1$) 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 (3)–(6) を用いてマルコフ推移確率行列

$$\Pi(Z) = \begin{bmatrix} \pi_{11}(Z) & \dots & \pi_{1J}(Z) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \pi_{JJ}(Z) \end{bmatrix} \quad (7)$$

を推定することができる. ハザード関数によって劣化の推移をモデル化していることから, 劣化が次のランクに進むまでの期待期間長 (RMD) は

$$\text{RMC}_i = \int_0^\infty \exp(-\theta_i y_i) dy_i = \frac{1}{\theta_i} \quad (8)$$

と表される. 式 (8) を用いて, 平均的な劣化過程を求めることができる. 以上のプロセスにより, 劣化推移の傾向を支配する因子ごとにデータをグループ分けし, パフォーマンス曲線を作成する. 舗装の場合, 床版種別, 路線別 (交通特性, 線形等の違い) による劣化の進展を表すパフォーマンス曲線を設定している. 図-8 には以上に述べた方法により得られた床版種別ごとの舗装のパフォーマンス曲線を示す. この図より, 土工部において舗装の劣化速度が速いことが理解できる.

図-8 舗装のパフォーマンス曲線

(4) 最適管理水準の設定

構造物の機能を継続的に維持するために必要な費用を, ライフサイクルコスト (LCC) により評価する. LCC は, 会社が支出する直接費用と利用者が負担する外部費用の和として,

LCC = 直接費用 (修繕費用, 維持費用)

+ 外部費用 (車両走行費用, 渋滞損失費用)

と表される. ここに, 各費用項目は以下のように定義される.

修繕費用: 補修工事に伴う工事費用に, 交通規制に伴う規制費用を加えた費用.

維持費用: 舗装の劣化に伴い, ポットホール補修や段差修正などの日常的な維持費用 (MCI に応じて設定).

車両走行費用: 車両の走行に伴う燃費や車体の減価償却等, MCI の低下に応じて利用者が余分に負担する費用.

渋滞損失費用: 工事規制に伴う渋滞に対して発生する利用者の損失費用.

なお上記のうち渋滞損失費用については, 区間ごとの渋滞状況と時間ロスをできるだけ忠実に表現するために, 別途開発されている交通管制システムの交通流シミュレーションモデル¹⁸⁾を用いて, 所要時間の変化や渋滞状況を把握し, 算定することができる. さらに, 補修ルールとして, MCI がある水準 (管理水準と呼ぶ) に到達した時点で, 舗装の補修を実施すると考えよう. このとき, 所与の管理水準に対して, その際に必要となる LCC を算定することができる. 図-9 は, 管理水準と LCC の関係を図示したものである. LCC が最小となるような MCC を最適管理水準と呼ぼう. また, 舗装の MCI が最適管理水準に至るようなタイミングが最適補修時期となる.

(5) 優先順位の決定

舗装の補修予算に制約がない場合, 各路線, あるいは区間の中で, MCI が, 最適管理水準に達した箇所 (路線) を各年度ごとに補修することにより, LCC の最小

図-10 最適管理水準

化を達成することができる。しかし、実際には予算制約があるため、各予算年度において補修を実施する区間の優先順位を決定する必要がある。H-BMSでは、図-9の概念図に示すように最適補修時期から補修を遅らせることによって生じるLCCの増加分(D:遅延コスト)と最適管理水準で補修を行った場合の修繕費用(C)との比(修繕効率 = D/C)の大きい順番に補修の優先順位を決定している¹⁷⁾。

(6) 試算結果

図-10は、今後100年を対象として、道路ネットワーク上のある1区間における管理水準とLCCとの関係を計算した結果を示している。この図から、この区間ではMCI = 6.3で補修することにより、LCCの最小化が達成できることが理解できる。

H-BMSは、外生的にシナリオとして与えた予算制約の下で、前述の優先順位に基づいて、各年度における補修箇所を選定し、補修を実施する過程をシミュレーションする機能を搭載している。図-11は、このようなシミュレーションを実施した場合に、検討区間において発生する直接費用の時間的な変化状態を予測した結果を表している。このうち、(a)は修繕費の予算制約をA億円/年、(b)はA+α億円/年(最適管理水準を維持するのに要する費用)に設定した場合の計算結

図-11 維持管理費用の推移

果を示したものである。(a)図では修繕費用の不足により、最適な補修タイミングを越え、状態の悪い舗装が存置される。そのため、それらの対応に必要な維持費用が2005年から増加し、およそ20年後には維持費用も予算限度額に達している。

一方、(b)では過去からの積み残しを順次消化することが可能であり、今から35年後には毎年予算限度額の中で、最適管理水準に基づいた補修を実行することが可能となる。さらに、100年間の維持費と修繕費を合計したトータルコストも11%程度縮減できる。

図-12は、検討区間における平均的なMCI水準と、当該区間の中で最低のMCI水準を求め、その時間的な変化状態を求めた結果である。図-12(a)、(b)は、図-11(a)、(b)に対応している。(a)では、今後継続的にMCIの平均水準が低下していく。その間、補修の積み残しが蓄積していくため、約20年後から最低機能水準が低下していく。その結果、管理水準が、阪神高速道路が設定する管理下限値を下回ることになる。なお、管理下限値とは、舗装のひび割れ、轍掘れ量とともに阪神高速道路が設定する判定基準「補修が必要なランク」に至る場合に該当し、MCIで言えば概ね4.2に該当する。それに対して、(b)では平均機能水準は長期的に現状レベルを維持し、最低機能水準も管理下限値を下回らない。

以上のことから、年間A億円の予算では舗装を長期

(a) 予算制約額 A 億円/年

(b) 予算制約額 $A + \alpha$ 億円/年

図-12 機能水準の推移

的に適切な水準を維持できず、年間予算として $A + \alpha$ 億円が必要であることが理解できる。

5. ロジックモデルを用いた管理水準の検討

(1) ロジックモデルの概要

新行政マネジメント (NPM: New Public Management) 理論によれば、すべての施策・事業には、必ず、その活動によって、どのような成果を産み出すのか (もしくは、産み出そうとしているのか) という論理・道筋の仮説が存在する¹⁹⁾。ロジックモデルは、最終的な成果 (阪神高速道路の場合、たとえば「顧客満足度の向上」や「道路通行車のリスク軽減」等) を設定し、それを実現するために、具体的にどのような中間的な成果が必要か、さらに、その成果を得るためには何を行う必要があるのかを体系的に明示するためのツールである。すなわち、評価対象となるプログラムを実施することによって、施策・事業の対象にどのように影響を及ぼし、最終的にどのような成果を上げていくのかについて、複数の段階・手順に分けて表現しつつ、それぞれについて一連の関連性を整理・図式化することにより、施策・事業の意図を明らかにするものである¹⁹⁾。

ロジックモデルは NPM 理論を支援する基本的ルールとして定着しており、行財政改革の実践の中で適用されてきた実績を持っている²⁰⁾。ロジックモデル作成

のマニュアルも提案され、特にアングロサクソン諸国において幅広く適用されてきた。わが国においても、アセットマネジメントの分野においても、オーストラリア等において適用事例が報告されている²¹⁾ (ただし、筆者の知る限り、アセットマネジメントのためのロジックモデルの具体例は報告されていない)。ロジックモデルは、具体的な活動から最終的な成果に至るまでの中間段階で起こりうるであろう様々な出来事を要素として示し、それら要素間の関係を 1 本もしくは複数の線でつなげることによって、成果達成のための道筋・手順を明らかにする役割を果たす。通常、施策・事業対象の変化・改善度合いを表すアウトカムについては、数段階 (例えば、中間・最終の 2 段階) にブレイクダウンして表現する。

4. で述べた H-BMS は、構造物の劣化過程を考慮して、LCC が最小になるような最適管理水準を求めることを目的としている。しかし、維持管理業務の中には、路面清掃や日常点検のように利用者へのサービスの提供を目的とし、LCC 等による工学的評価が困難な業務も存在する。このような業務の望ましい管理水準に関しては、とすれば「会社は道路を常時良好な状態に保つように適正かつ効率的に高速道路の維持、修繕その他の管理を行い、もって一般交通に支障を及ぼさないように努めなければならない」³⁾ というような定性的・抽象的な規定に止まり、具体性や定量性に欠ける表記がなされることが多かった。これに対して、阪神高速道路では、利用者にサービスを提供することを目的とする管理項目に関しても、「アウトカム-アウトプット-インプット」の関係をロジックモデルを用いて表現し、会社が目標とする管理水準とそれを達成するためのインプットを可能な限り定量的、具体的に記述することにより、アカウントビリティの向上を試みている。

(2) HELM の作成

ロジックモデルとは、顧客満足度やリスクの軽減等の維持管理に関する最終的な成果を実現化するために、それらに必要な具体的な個々の活動が、どのような道筋で達成したい成果へたどりつき、それらが相互にどのように関連しているかを体系的に図式化する方法である。

さらに、関連するインプット、アウトプット、アウトカムを指標化 (数値化)、関数化して表現することにより、アウトカム (成果) のコストパフォーマンスを最大化させることを目的とする。維持管理業務を対象として、ロジックモデルを作成することにより、

- ・ 目的と作業の関係 (因果の連鎖) を明らかにし、維持管理作業に対する理解を深めることができる

図-13 検討フロー

- ・ 維持管理作業の成果を、定量的に把握することにより、作業が適正に実施されているかについて、評価・検証が可能となる
- ・ 路線ごと、施設ごとの重点化を図ることが可能となる
- ・ 維持管理作業の成果について、計画、実施などの各段階における情報を蓄積することにより、継続的な検証・改善を図ることが可能となる

という利点がある。図-13に、ロジックモデルの検討フローを示す。ロジックモデルを作成する場合、現場の維持管理業務において得られる情報に基づいて、アウトカム指標、アウトプット指標を測定できることが重要となる。さらに、アウトカム指標とアウトプット指標の関係、インプット指標とアウトプット指標の関係を評価し、継続的にアウトカム、アウトプット指標の改善に資するようなインプットを求める努力が必要となる。現在、アウトプット、わかりやすいアウトカムの指標、計測およびリスク評価の方法について検討中である。図-14に、現時点における阪神高速道路の維持管理業務を対象としたHELMの基本構成(案)を示している。HELMは、阪神高速道路の維持管理業務を支える維持管理技術とマネジメント技術を集大成したものであり、ロジックモデル全体は膨大な内容になっている。ここでは、HELMを構成するサブロジックモデルの中から、路上点検業務を例に取り、その内容を紹介する。

(3) リスク管理水準(路上点検業務を例として)

路上点検は、高速道路上を点検車により走行しながら、主に目視または車上感覚により、舗装、伸縮継手および付属構造物等の損傷の程度を点検する業務である。また点検の頻度は構造物の供用年数、交通条件、環境条件に加え、これまでの損傷の発生状況などを総合的に勘案しながら決定される⁴⁾。いま、路上点検業務に関するアウトプットの評価指標の1つとして、穴ぼこ滞留量(単位延長当たり何件の穴ぼこが存在しているかを表した指標)をとりあげる。この評価指標は、

穴ぼこ滞留量(件/km・回)

$$= \frac{\text{年間Sランク穴ぼこ発生件数(件/年・km)}}{\text{日常点検頻度(回/年)}}$$

により算定できる。

路上に生じた穴ぼこにより、タイヤがパンクしたり、あるいはハンドル操作ができなくなり事故を起こす危険性があると考えれば、穴ぼこ滞留に起因するリスクは穴ぼこの発生確率と影響度の積と考えられる。すなわち、穴ぼこの発生確率を穴ぼこ滞留量、影響度をその路線の断面交通量と考えると、

$$\text{リスク値} = \text{穴ぼこ滞留量} \times \text{断面交通量}$$

で表される。

図-15上図は、現状の各路線におけるリスク値(縦

図-14 HELM の基本構成 (案)

軸)と、断面交通量(横軸)をプロットしたものである。この図において、全路線のリスク値の平均を破線で示しているが、この破線より上位に位置している路線はリスクが大きく、下側に位置する路線はリスクが小さ

いことを示している。さらに、**図-15** 下図は、縦軸に
 アウトプット指標である穴ぼこ滞留量を用いて、アウ
 トプット指標と断面交通量の関係を示したものである。
 図中の双曲線は、リスク値が一定となるような穴ぼこ

図-15 リスクカーブ

滞留量と断面交通量の関係を示したものである。したがって、ある基準となるリスク値と対応する双曲線をベンチマーク曲線と考えれば、ベンチマーク曲線より右上方に位置する路線はリスク値がリスク管理水準を越えていると判断することができる。

なお、図-15では、リスク曲線（管理基準値）を、暫定的に全路線のリスクの平均値を用いて設定していた。現在、リスク曲線を路上点検頻度と穴ぼこに起因する事故や管理瑕疵との関係や利用者のアンケート調査を実施し、より利用者のニーズに即した管理基準値を設定するような検討を試みている段階である。

ここでもう一度、路上点検に関するロジックを考えてみよう。穴ぼこ滞留リスクには、以下のような因果関係が存在していることが理解できる。

路上点検の頻度を下げる→穴ぼこを発見するのが遅れる→穴ぼこに起因する事故が増える→走行安全性が確保出来ない→利用者サービスの低下

HELM は、維持管理業務におけるすべての管理項目に関して、このような因果関係を整理し、リスクマネジメントの立場から包括的に管理水準を決定しようとする試みである。阪神高速道路では、図-14 に示した HELM の基本構成（案）に基づいて、個々の管理業務に対してアウトプット、アウトカムを計算し、最適管

理水準を設定する努力を重ねている。

6. おわりに

本論文では、阪神高速道路の維持管理の現状および課題について取りまとめるとともに、現在実施している維持管理業務の高度化への取組みについて述べた。阪神高速道路が抱える最大の課題は、今後ますます高齢化する多種多様の構造物を良好な状態で維持し、同時に都市高速道路としてふさわしいサービスを、利用者に阪神高速道路の債務返済が完了するまでの45年間に亘って持続的に提供し続けることのできる管理手法の確立であると認識している。

本稿で紹介した H-BMS、および HELM は、阪神高速道路の維持管理業務を支援する重要な手段である。特に、H-BMS は、維持管理の中長期計画の策定や説明責任のためのツールとして有効な手段であるし、HELM を用いた管理水準の設定は従来の定性的な維持管理業務を定量的に表現することを可能にする有効な手段であろうと考えている。もちろん、課題が残っていないわけではない。H-BMS に関しては、構造物全体レベルでの総合評価を含めた他工種への適用の拡大や、精度の向上などが今後に残された課題である。HELM では、管理水準の設定にあたり、評価指標の妥当性の検証や、路上点検以外の他業務におけるリスク評価手法の開発が必要である。これらの課題を解決することにより、「利用者に満足していただけるサービス水準の確保」と「コスト縮減」を両立させる、阪神高速道路が目指す合理的な維持管理が実現できると考えている。

20世紀が「建設の時代」であったのに対し、21世紀は整備された社会資本を良好な状態に維持する「維持管理の時代」といわれている。このような時代背景のなかで、阪神高速道路は2005年10月、それまでの公団から株式会社に移行した。会社設立時に定めた企業理念「先進の道路サービスへ」に掲げているように、安全・安心・快適なネットワークの提供は阪神高速道路が果たすべき使命であると捉え、日々の保全業務に取り組んでゆく所存である。

謝辞：本論文は、「阪神高速道路（株）技術審議会 道路資産システム分科会」での検討成果の一部をとりまとめたものであり、貴重なご指導・ご助言をいただきました関西大学古田均教授、神戸大学森川英典教授をはじめ関係各位に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 片山大介、西林素彦、閑上直浩：阪神高速道路の橋梁マネジメントシステムについて、第26回日本道路会議、No.11007, 2005.

- 2) Nishibayashi, M., Kanjo, N. and Katayama, D.: "Toward more practical BMS: Its application on actual budget and maintenance planning of a large urban expressway network in Japan", *Proceedings of the Third International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management*, Porto, Portugal, pp. 915-916, July 2006.
- 3) 独立行政法人日本高速道路保有・債務返済機構, 阪神高速道路 (株): 大阪府道高速大阪池田線等に関する協定, 第 13 条.
- 4) 阪神高速道路 (株): 道路構造物の点検要領, 2005.
- 5) 川村圭, 宮元文穂, 中村秀明, 三宅秀明: 階層構造ニューラルネットを用いたコンクリート橋診断エキスパートシステムの実用化, 土木学会論文集, No.665/VI-49, pp.45-64, 2000.
- 6) 水谷守, 足立幸郎, 小塚幹夫: 経年劣化構造物の維持補修計画最適化に関する研究, ICOSAR '95 論文集, pp.341-348, 1995.
- 7) 古田均, 金森敦司, 堂垣正博: ライフサイクルコストを考慮した橋梁群の RC 床板の最適維持管理計画支援システムに関する研究材料, Vol. 47, No. 12, pp. 1245-1250, 1998.
- 8) 古田均, 亀田学広, 伊藤弘之, 高橋祐治: 遺伝的アルゴリズムを用いたコンクリート橋梁群の最適維持管理計画の策定, 応用力学論文集, Vol. 5, pp.919-926, 2002.
- 9) 青木一也, 若林伸幸, 大和田慶, 小林潔司: 橋梁マネジメントシステムアプリケーション, 土木情報利用技術論文集, Vol. 14, pp.199-210. (<http://psa2.kuciv.kyoto-u.ac.jp/bms/index.html>)
- 10) Madanat, S.: Incorporating inspection decisions in pavement management, *Transportation Research, Part B*, Vol. 27B, pp.425-438, 1993.
- 11) Madanat, S. and Ben-Akiva, M.: Optimal inspection and repair policies for infrastructure facilities, *Transportation Science*, Vol. 28, pp. 55-62, 1994.
- 12) 貝戸清之, 保田敬一, 小林潔司, 大和田慶: 平均費用法に基づいた橋梁部材の最適補修戦略, 土木学会論文集, No.801/I-73, pp.83-96, 2005.
- 13) 小林潔司: 分権的ライフサイクル費用評価と集計の効率性, 土木学会論文集, No.793/IV-68, pp.59-71, 2005.
- 14) <http://www.pontis.com/>
- 15) 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.69-82, 2005.
- 16) 舗装の管理水準と修繕工法に関する総合的研究, 第 41 回建設省技術発表会, 1989.
- 17) 田村謙介, 小林潔司: 不確実性下における道路舗装の修繕ルールに関する研究, 土木計画学研究・論文集, No.18 (1), pp.97-107, 2001.
- 18) 石井康裕, 田名部淳: 阪神高速道路における交通流シミュレーションの開発と運用, 第 25 回日本道路会論文集, 2003.
- 19) 大住莊一郎: ニューパブリック・マネジメント, 日本評論社, 1999.
- 20) (財) 農林水産奨励会・農林水産政策情報センター: ロジックモデル策定ガイド, 2003.
- 21) Australia NSW Government Asset Management Committee: Total Asset Management Manual, 1992.

(2006. 9. 15 受付)

Hanshin Expressway is the 233.8 km long expressway network in Osaka-Kobe area consisted mainly of viaduct structures. Starting from only the 2.3 km section in 1964, the network has been expanded to the one covering the whole area and now accommodates more than 900 000 vehicles per day. Since it is one of most important transportation infrastructures in the area, the highest level of maintenance quality is always required and we have met the need by developing many efficient maintenance methods. However, even the vast amount of structures are aging and rapidly deteriorating, the further rationalization of the maintenance activities is demanded to fulfill the goal of 30% reduction of maintenance budget set after the company's privatization in 2003. This paper introduces Hanshin Expressway Bridge Management System (H-BMS) which is a custom-made tool to evaluate the effects of such budget restriction against structural quality as well as to help construct an appropriate medium or long-term maintenance plan. Also, it explains about the methodology of setting a quantitative performance standard for routine maintenance works using Hanshin Expressway Logic Model (HELM).