

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

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(株) 井上 裕司*2
京都大学経営管理大学院 小林 潔司*3
By Yasuhito SAKAI, Yuji INOUE
and Kiyoshi KOBAYASHI

舗装を合理的に修繕するための課題の1つに適切な修繕範囲の設定がある。舗装は箇所毎に劣化速度が異なるため、修繕費用のみに着目すると劣化箇所を最適なタイミングでその都度修繕する個別施工が有利となる。しかし実際は、交通規制を伴う渋滞損失等を抑えるためにある範囲を同時に修繕する同時施工が行われる。今回、阪神高速道路を対象に、個別施工と同時施工を実施したときに発生するトータル費用を比較し、同時施工の有効性を検証した。その結果、トータル費用に占める割合は渋滞損失費用が圧倒的に多く、渋滞が発生する箇所では同時施工、発生しない箇所では個別施工が有利となることが判明した。また、この結果を踏まえて、阪神高速道路全線を同時施工区間と個別施工区間に分け、同時施工によるコスト削減効果を調べたところ、同時施工によるコスト削減効果は年間375億円に達する結果となった。

【キーワード】都市高速道路、舗装修繕、同時施工、コスト削減、LCC

1. はじめに

阪神高速道路は1964年（昭和39年）の供用開始以来、大阪・神戸を中心に整備が進められ、2007年（平成19年）現在、供用延長は233.8km、通行台数は約90万台/日に達し、地域経済に大きく貢献している。しかし、供用開始以来すでに40年以上が経過し、既存施設の高齢化に加えて、供用延長の約80%が橋梁構造であることや大型車混入率が約20%に達する等の都市高速道路特有の厳しい条件を有しており、今後、維持修繕費の増大やサービス水準の低下が懸念されている。

一方、維持修繕費は、平成5年度をピークに減少に転じており、さらに平成15年12月の政府・与党の申し合わせを踏まえて維持修繕費の大幅な削減に取り込んでいる。このような背景から、従来と同様の

サービスを継続的に提供するためには、より一層の効率化・合理化が不可欠となっている。

阪神高速では、修繕費の中で舗装の占める割合が高い。また、舗装は車両の走行性や安全性、周辺への騒音や振動等に直接影響することから、舗装修繕の効率化は維持管理の合理化を図る上で最も重要な課題の一つである。

合理的な舗装修繕の課題の一つに「修繕範囲」の問題がある。舗装は使用環境等の違いによって箇所毎に劣化速度が異なる。そのため、打ち換え費用のみに着目すれば、傷んだ箇所のみをその都度修繕する「個別施工」が効率的となる。しかし、実際にはこのような手法は採用されず、劣化が進行していない箇所も含めてある程度の範囲を同時に修繕する「同時施工」が行われる。これは、舗装修繕では交通規制が必要となり、打ち換え費用の他に渋滞損失費用等の外部コスト（社会的損失）や規制費用が発生するためである。特に、都市高速では渋滞等の社会損失が大きいことから、これらを抑えるために阪

*1 保全交通部 Tel.06-4963-5588

*2 計測診断系グループ Tel.06-6160-2132

*3 経営管理講座 教授 Tel.075-383-3224

神高速ではロング規制や通行止めによる大規模な同時施工を実施している。同時施工の有効性は、劣化が進行していない箇所を早期に修繕することによるデメリット（過剰投資）と外部コストを抑制できるメリット（コスト縮減）との大小関係によって決定されると考えられる。

今回、阪神高速を対象に個別施工を行った場合と同時施工を行った場合のトータル費用を算出し、それらの比較を通じて同時施工の有効性を検証した。また、検証結果を踏まえて、阪神高速の全路線の中で同時施工が有利となる区間を選定すると共に、同時施工によるコスト縮減効果を算出した。本稿では、これらの検討の内容とその結果について報告する。

2. 舗装の維持管理の概要

本章では、まず、阪神高速における舗装の維持管理の現状として、点検、修繕、マネジメントシステムの内容を概説する。

(1) 点検

阪神高速では、土木構造物を対象に点検要領¹⁾を策定しており、本要領に準じて定期的に舗装（路面）状態を点検している。近年では路面点検車両によって2～3年毎にわだち掘れ量、ひび割れ率、縦断凸凹量を計測している。また、計測された点検記録は舗装の管理単位である径間毎、車線毎にデータベースシステムである保全情報管理システム²⁾に蓄積している。

(2) 修繕

点検と同様、補修も標準的な手法を定めた補修要領³⁾を策定しており、舗装のわだち掘れとひび割れ（応急補修を除く）に対しては打ち換え補修を標準としている。

また、舗装修繕は交通規制を伴うため、阪神高速では警察協議によって修繕に伴う規制延長は最大2kmと定められている。さらに、大阪管理部内では規制に伴う渋滞損失が非常に大きいことを踏まえて全線通行止めによる集中工事を行っており、舗装修繕（打ち換え）は基本的にこの時に合わせて集中的に実施している。

(3) 橋梁マネジメントシステム（H-BMS）

阪神高速では構造物の維持管理の効率化を図るために、様々な取り組みを行っている。これらの一

表－1 検証ケース

	ケース 1 1 径間規制	ケース 2 2 km規制	ケース 3 全線 1 車線規制
区間数	2080	32	4
規制日数	1 日	2 日	4 日

つとして阪神高速道路橋梁マネジメントシステム（H-BMS : Hanshin expressway Bridge Management System）の開発を進めており、すでに舗装、塗装、伸縮継手、床版、鋼構造物、コンクリート構造物、支承の7工種の計算機能を有するH-BMS ver.2.0を構築し、一部で運用を開始している^{4)~6)}。

H-BMSは、ライフサイクルコスト（LCC）が最小となる最適管理水準の算出や将来における費用と状態（機能水準）の推移をシミュレーションできる機能を有しており、必要予算の把握や優先順位の判断、説明資料の作成等に活用している。なお、H-BMSでは、阪神高速が直接支出する修繕費用や維持費用だけでなく渋滞損失費用と車両走行費用の外部コストを含めたLCCを最小化することで、阪神高速からの支出だけでなく利用者への不便益（サービスの低下）を最小限に留める修繕時期を計算することができる。

3. 同時施工の有効性検証

3.1 検証方法

同時施工の有効性の検証手順を以下に述べる。まず、阪神高速の実態に即したモデル路線を設定する。次に、モデル路線に対して個別施工と同時施工を行った場合に発生する費用をH-BMSによってシミュレーションする。最後に、それぞれのケースにおいて発生する今後100年間の費用総額（トータル費用）を比較し、同時施工の有効性を検証する。

(1) 検証ケース

表－1に検証ケースを示す。検証ケースは、現状では舗装の管理を1径間・1車線単位で行っていること、1回の規制長が最大2kmであること、大阪管理部では毎年全線通行止めによる集中工事を実施していることを考慮し、1車線を1径間毎に規制する1径間規制（ケース1）、2km毎に規制する2km規制（ケース2）、全線にわたって規制する全線1車線規制（ケース3）の3ケースとした。なお、阪神高速道路の平均径間長は約40mである。また、ケース3は全線通行止めと異

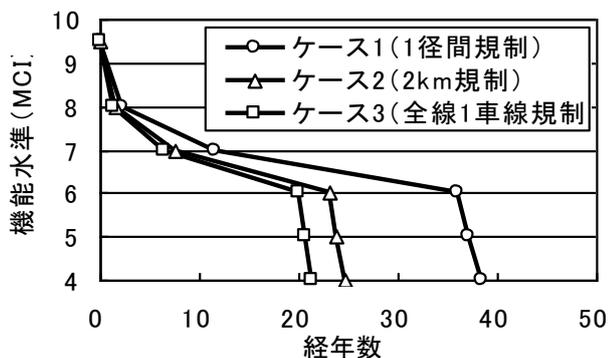


図-1 劣化曲線

なるが、全線通行止めの条件では渋滞損失費用の算出に用いる交通流シミュレーションシステム (HEROINE)⁷⁾の計算精度が低下し、実態との乖離が大きくなることから上記のように設定した。HEROINEは、任意の場所を規制した時の交通流予測機能を備えており、一般道への迂回もモデル化されている。しかし、一般道は静的モデルで迂回量に応じて変動しないため、全線通行止めのように一般道の交通容量を超える迂回量が発生する条件では、計算結果が実態と乖離することが判明している。

(2) モデル路線の設定

モデル路線は、阪神高速の実態を反映するために、実際の路線の中から代表路線を選定し、それを基に設定した。代表路線は、中心部と末端部の交通量の差が大きく交通量や渋滞損失の変化に伴う傾向が把握し易いこと、現時点でのMCI (Maintenance Control Index) のバラツキが全線とほぼ同じ傾向を示すこと、前年度に点検が行われており点検データが充実していること等の理由から池田空港線 (環状分岐～池田、蛍池線含む) を選定した。ここで、MCIは旧建設省が提案した舗装の劣化指標である⁸⁾。また、傾向を分析し易くするために、代表路線に対して、車線は全て2車線、床版は全てコンクリート床版、本線・車道以外の非常駐車帯等は除外するとの補正を施し、モデル路線を単純化した。設定したモデル路線の区間数を表-1に示す。

(3) 劣化曲線の設定

同時施工では、施工範囲内に複数の区間 (径間・車線) が含まれるため、修繕タイミングは同時施工範囲内に含まれるある区間が最適管理水準に達した段階で実行される。そのため、同時施工を考慮する

表-2 規制1回当たりの渋滞損失費用

(a) 上り

規制箇所 キロポスト	渋滞損失費用 (億円)		
	ケース1	ケース2	ケース3
0.0	1.5	5.0	5.7
2.0	1.2	4.3	
4.0	0.9	3.6	
6.0	0.6	2.9	
8.0	0.3	2.2	
10.0	0.0	1.5	
12.0		0.7	
14.0		0.0	

(b) 下り

規制箇所 キロポスト	渋滞損失費用 (億円)		
	ケース1	ケース2	ケース3
0.0	4.0	20.0	25.0
2.0	3.4	17.2	
4.0	2.8	14.3	
6.0	2.2	11.5	
8.0	1.6	8.6	
10.0	1.0	5.8	
12.0	0.4	3.0	
14.0	0.0	0.1	

ケース2とケース3では、同時施工範囲の中で最も低い機能水準を当該施工範囲の機能水準とした。

H-BMSに採用している劣化曲線は、津田等の提案する多段階劣化指数ハザードモデル (付録参照) による推計結果を基に設定している⁹⁾。そのため、本検証でも保全情報管理システムに蓄積されているモデル路線 (池田空港線) におけるRC床版の点検結果から上記の手法で推計した劣化曲線を採用した。

また、今回の検証では、舗装は設定した劣化曲線に従って劣化するものと仮定する。しかし、実際の劣化には不確実性があり、区間によって劣化速度が異なる。そのため、施工範囲内にある1区間が修繕タイミングに達した時点で当該施工範囲の全区間を修繕する同時施工では、路線の平均修繕周期が個別施工に比べて早くなる。この影響をみかけの劣化曲線として表現するために、昨年度における池田空港線の実測データを用いて、同時施工範囲が表-1の3ケースの場合に路線全体の平均修繕周期がどの程度異なるのかを調べた。その結果、ケース2とケース3の平均修繕周期はケース1に対してそれぞれ1/1.56, 1/1.80となった。よって、ケース2とケース3ではケ

ース1の劣化曲線を上記の比率で補正した曲線を用いることにした。

図-1に、ケース1~3に対して設定した劣化曲線を示す。

(4) 渋滞損失費用の設定

本検証では、渋滞損失費用、修繕費用、維持費用、車両走行費用の4つの費用を考慮する。

阪神高速では任意の場所を規制したときに発生する渋滞を予測できる交通流シミュレーションシステム（HEROINE）を開発している⁷⁾。渋滞損失費用は本システムによって算出された損失時間に時間評価値（原単位）を乗じることによって算出した。

表-2に、設定した規制1回当たりの渋滞損失費用を示す。ケース1~3の規制日数は、これまでの実績を踏まえてそれぞれ1日、2日、4日とした。また、阪神高速の大半では騒音が発生する修繕を夜間に実施できないことから、修繕は基本的に休日の昼間に行う条件とした。これらの条件より、通常時（規制なし）と規制時（規制あり）の場合の路線総旅行時間（台・時間）をHEROINEで計算し、この差分を規制に伴う損失時間とした。また、HEROINEでは最大予測期間が24時間であるため、ケース1では8:00~16:00、ケース2とケース3では8:00~24:00までを規制時間とし、算出された休日1日当たりの損失時間に規制日数をかけることで損失時間を算出した。次に、渋滞損失費用を算出するための原単位は、平成15年度の経済統計より国民総所得を就業者数で割った1人当たりの所得を年間労働時間で割った時間評価値に、阪神高速の平均乗車率1.4人を掛けた76.7円/台・分とした。

HEROINEによるシミュレーションの結果、交通量の多い環状線付近では渋滞損失時間が大きく末端部に向かって減少すること、下り線では他路線まで渋滞が影響するため上り線より渋滞損失が大きくなること等、実態に近い現象が再現できた。

(5) 修繕費用の設定

修繕費用は、過去における舗装の打ち換え実績から平均的な修繕費用を設定した。表-3に、設定した修繕費用を示す。

H-BMSでは、舗装の修繕シナリオをMCIが4.2未満なら表基層打ち換え、4.2以上8.5未満なら表層打ち換え、8.5以上なら修繕なしと設定している。また、

表-3 修繕費用

修繕工法	修繕費用 (円/m ²)	規制費用 (円/m ²)
表層打換	1,950	150
表基層打換	5,850 (RC床版)	
	7,800 (鋼床版)	
	3,770 (土工)	

表-4 維持費用

MCI	費用 (円/m ²)
10.0~9.0	31
8.9~8.0	50
7.9~7.0	71
6.9~6.0	90
5.9~5.0	109
4.9~4.0	129
3.9~3.0	148

表-5 車両走行費用

MCI	費用 (円/台・km)	
	大型車	小型車
9.5	0.00	0.00
8.0	0.71	0.09
7.0	1.18	0.15
6.0	2.29	0.21
5.0	4.20	2.03
4.0	5.56	3.10
3.0	7.92	5.49

表基層打換えの費用は舗装下の条件によって異なることから、表基層打換えはRC床版、鋼床版、土工毎に費用を設定した。

(6) 維持費用、車両走行費用の設定

表-4に、本検証に用いた維持費用を示す。突発的なポットホールやひび割れ等の対策のために日常的に費やされる維持費用は、旧建設省が一般国道を対象に行った調査結果¹⁰⁾に基づいて設定した。この調査で設定された維持費用は昭和62年の値であるため、本検証では国土交通省発表の建設工事費デフレーターを用いて補正した。なお、昭和62年に対する現在のデフレーターは1.14であった。また、これは一般国道に対する値であり、都市高速道路と異なると考えられるが、他に維持費用を算出した事例が無いことと、過去の発注実績から維持費用分を抽出することは不可能であることが判明したことから、本検証ではこの値を用いた。

表-5に、本検証に用いた車両走行費用を示す。

車両走行費用は、旧建設省が平成元年に国道において走行試験を実施し、MCIと車両走行費用の関係を定量的に調査した事例¹¹⁾を参考に設定した。なお、車両走行費用は維持費用のようなデフレータ補正を行っていない。ここで、車両走行費用に含まれる費用は、燃費、車両の維持修繕費、減価償却費の3つである。本検証では、ここで設定されたMCIと車両走行費用との関係を線形補完し、MCI=9.5時点における車両走行費用からの差を車両走行費用として用いた。このようにMCI=9.5時点からの差を車両走行費用としたのは、阪神高速における竣工時のMCIが約9.5であり、それからの差分がMCI低下に伴う利用者損失と見なすことができるためである。車両走行費用も一般国道を対象に設定された値であるが、これはMCIに対する値であることから、都市高速にも準用可能と考えられる。

(7) トータル費用の算出

以上の条件から、H-BMSによってケース1~3に対するトータル費用を算出する。H-BMSでは、無限遠方までに発生する費用の割引現在価値（社会的割引率4%）の累計額をLCCと定義し、LCCが最小となる最適管理水準を計算することができる。本検証では舗装の機能水準（MCI）が最適管理水準に達した時点で直ちに修繕が実行されるものとし、今後100年間に発生する修繕費用、維持費用、渋滞損失費用、車両走行費用の合計をトータル費用として算出する。

なお、H-BMSではLCCで考慮されていない事故や騒音等を便宜的に考慮するために管理下限値を設定している。H-BMSにおけるシミュレーションでは舗装の機能水準が管理下限値に達すると、管理下限値を最適管理水準として直ちに修繕が実行される。管理下限値は点検要領における判定区分に準じて、最大わだち掘れ量又は平均ひび割れ率のどちらかがA判定に達する水準としてMCI=5.6に設定している。

3.2 検証結果

(1) モデル路線におけるトータル費用

表-6に、ケース1~3に対して算出された今後100年間のトータル費用（修繕費用+維持費用+車両走行費用+渋滞損失費用）の合計額を示し、各費用が占める割合を図-2に示す。図-2より、トータル費

表-6 トータル費用の年平均（億円/年）

		ケース1	ケース2	ケース3
直接費用	修繕費用	0.20	0.19	0.31
	維持費用	0.16	0.16	0.16
外部コスト	渋滞損失費用	47.23	8.31	3.57
	車両走行費用	0.43	0.48	0.28
トータル費用		48.02	9.15	4.32

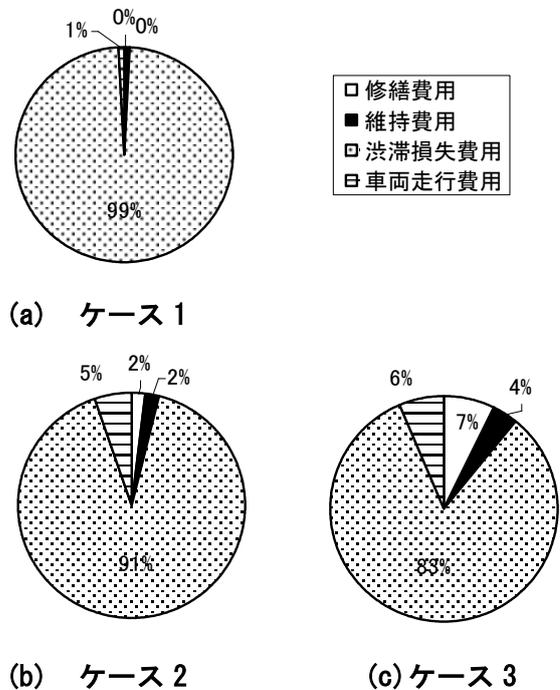


図-2 各費用がトータル費用に占める割合

用に占める割合は、渋滞損失費用が圧倒的に大きくなった。また、表-6より同時施工を行うケース2とケース3では規制回数の減少に伴って渋滞損失費用が大幅に低下した。一方、修繕費用は、ケース1とケース2がほぼ同じとなり、ケース3は若干増加示した。ケース3の修繕費が増加した理由は修繕のタイミングが早まるためと考えられる。ただし、修繕費用の増加量は渋滞損失費用の減少量と比べると非常に小さかった。

モデル路線に対する以上の結果から、同時施工によってトータル費用の大部分を占める渋滞損失費用が大幅に低減することが確認できた。

(2) 同時施工の有効性判断

モデル路線は、環状線合流部から末端部に向かって交通量が減少し、渋滞損失が低下する特徴を有している。そのため、ケース1とケース2を対象に2キロポスト毎におけるトータル費用を比較し、同時施工

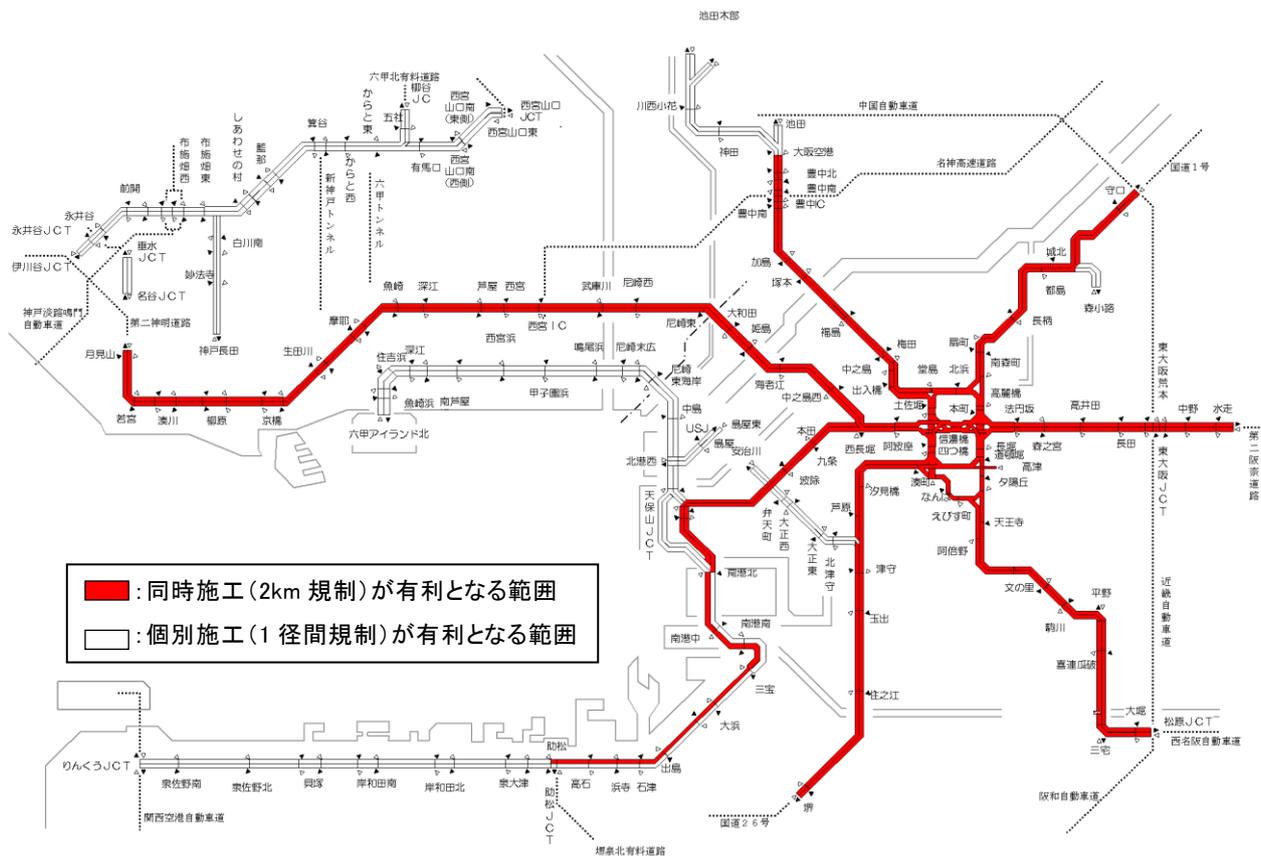


図-3 同時施工が有利となる範囲と個別施工が有利となる範囲

が有効となる条件について考察した。

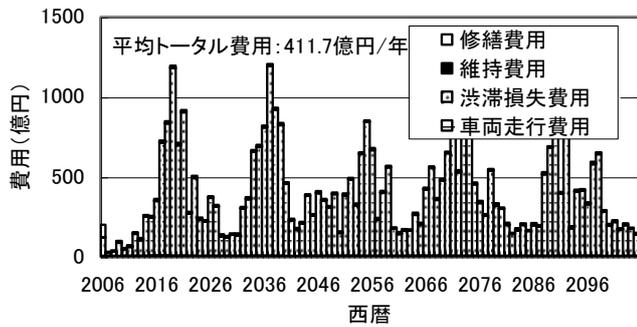
表-7に、両ケースにおいて今後100年間におけるトータル費用を2キロポスト毎に算出した結果(年平均費用)とその差を示す。これより、10.0キロポストを境にケース1とケース2でトータル費用が逆転した。つまり、0.0~10.0キロポストでは1径間規制より2km規制の方が効率的となり、10.0~14.2キロポストでは反対に2km規制より1径間規制の方が効率的となった。このように、個別施工のケース1と同時施工のケース2で傾向が逆転する理由は、キロポストの増加に伴って交通量の減少し、同時施工による渋滞損失費用の抑制効果が低下するためと考えられる。

個別施工と同時施工でトータル費用が逆転する8.0キロポストと10.0キロポストの1径間規制時の渋滞損失費用から個別施工が有利となる条件を求めた。その結果、1径間・1車線規制1回当たりに発生する渋滞損失費用が300万円以下になると同時施工より個別施工の方が有利となる結果となった。なお、この渋滞損失費用が発生するときの2車線当たりの断面交通量は、概ね2万台/日であった。

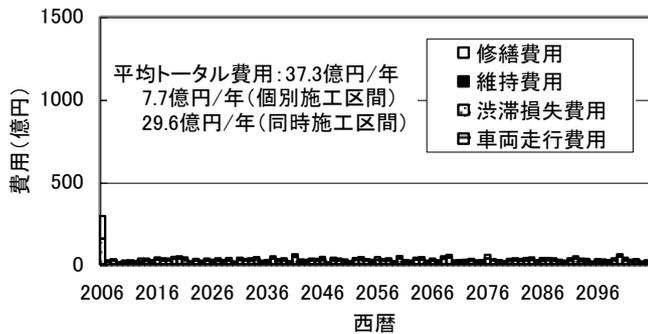
表-7 キロポスト毎のトータル費用とその差(億円/年)

キロポスト	ケース1 1径間 規制	ケース2 2km 規制	差
0.0-2.0	1.25	0.48	0.78
2.0-4.0	2.94	0.41	2.57
4.0-6.0	1.86	0.35	1.51
6.0-8.0	1.49	0.28	1.21
8.0-10.0	0.46	0.23	0.23
10.0-12.0	0.10	0.16	-0.06
12.0-13.4	0.05	0.11	-0.06
13.4-14.2	0.03	0.08	-0.05

図-3に、上記の結果にしたがって阪神高速全路線を同時施工(2km規制)が有利となる範囲と個別施工(1径間規制)が有利となる範囲に分類した結果を示す。これより、同時施工が有利となる範囲は渋滞の発生しやすい大阪中心部からの放射路線となり、個別施工が有利となる範囲は交通量の少ない放射路線の末端部や北神戸線、車線数の多い湾岸線等となった。



(a) 個別施工



(b) 同時施工考慮

図-4 トータル費用の推移

表-8 全線に対するトータル費用の年平均(億円/年)

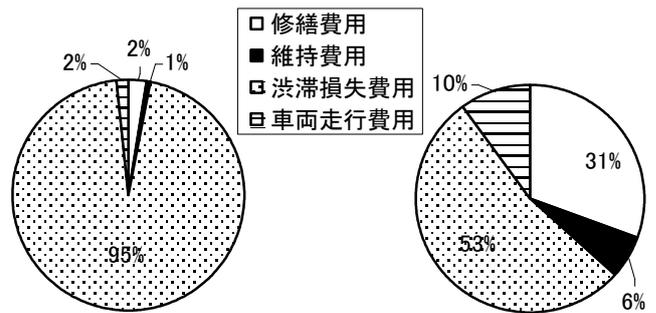
		個別施工	同時施工考慮	
			1 径間 区間	2km 区間
直接 費用	修繕費用	10.0	6.3	5.1
	維持費用	2.8	0.8	1.4
外部 コスト	渋滞損失費用	392.0	0.0	19.9
	車両走行費用	7.0	0.6	3.1
トータル費用		411.7	7.7	29.6
			37.3	

4. コスト縮減額の算出

阪神高速の全路線を径間・車線毎に個別施工した場合と、図-3示した範囲毎に同時施工と個別施工を使い分けた場合における今後100年間のトータル費用の推移をH-BMSで計算し、同時施工を考慮することによるコスト縮減効果を算出した。

同時施工を考慮しないケース(個別施工)と同時施工を考慮するケース(同時施工考慮)における今後100年間におけるトータル費用(年平均費用)の推移と合計額をそれぞれ図-4、表-8に示す。

図-4と表-8より、同時施工を考慮することによって1年当たりの渋滞損失費用は392億円/年から20



(a) 個別施工

(b) 同時施工考慮

図-5 トータル費用に占める各費用の割合

億円/年に大幅に低下した。直接費用では、修繕タイミングが早まるために修繕費用が1.4億円/年増加したが、早期の修繕によって路面の状態が良好な水準に保たれることから維持費用が0.6億円/年減少し、この2つを合わせた支出は0.8億円/年の増加となった。一方、外部コストは、上記の渋滞損失費用に加えて、路面が良好な水準で維持されるために車両走行費用が3.3億円/年縮減され、渋滞損失費用と合わせた外部コストのコスト縮減額は376億円/年となった。直接費用と外部コストを合計したトータル費用では、個別施工の412億円/年に対して、同時施工を考慮したは37億円/年となり、2kmの同時施工を考慮することによるコスト縮減額は375億円/年に達する結果となった。

次に、各費用のトータル費用に占める割合を図-5に示す。図-5より、個別施工を行った場合ではトータル費用の95%が渋滞損失費用で占められるが、同時施工を考慮した場合は渋滞損失費用が低下した。一方、修繕費用は増加したため、トータル費用に占める割合は渋滞損失費用が53%、修繕費用が31%となり、比較的均衡する結果となった。

図-6に、LCC計算の結果例を示す。図-6は、修繕時機能水準とLCCの関係を示しており、LCCが最小となる機能水準が最適管理水準となる。これより、個別施工では渋滞損失費用の割合が大きいため可能な限り修繕を遅らせることが有利となるが、同時施工では渋滞損失費用が低下するため、最適管理水準が高い水準に移行していることが分かる。これより、同時施工によって渋滞損失費用を軽減することは、結果的に舗装の水準を高く維持することが有利となり、この点からも望ましい結果となった。

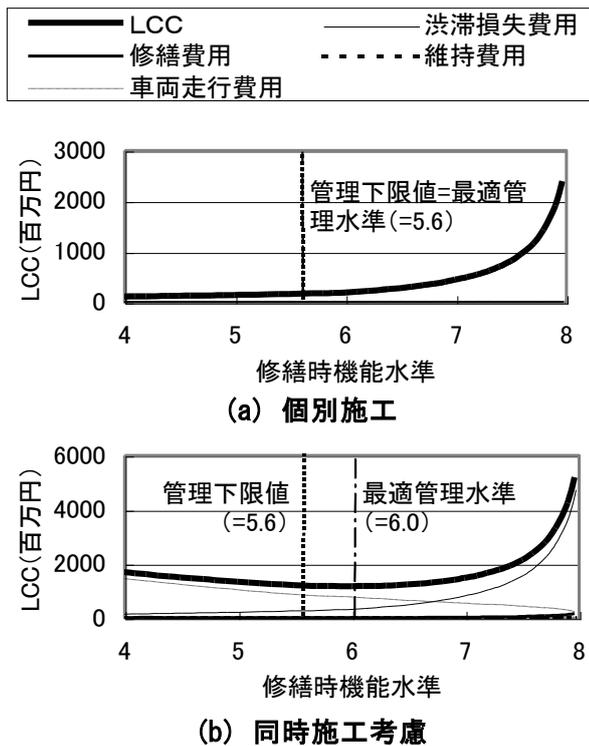


図-6 LCC 計算による最適管理水準の算出結果例

5. まとめ

阪神高速を対象に、舗装を1径間・1車線毎に最適なタイミングで修繕する「個別施工」と複数箇所を同時に修繕する「同時施工」を実施したときに発生するトータル費用を比較し、舗装修繕における同時施工の有効性を検証した。その結果、都市高速では渋滞損失費用が非常に大きいため、同時施工による規制回数の減少に伴って大幅に渋滞損失費用が低下することが判明した。また、モデル路線での検証結果から1径間・1車線規制1回当たりに発生する渋滞損失費用が300万円以下であれば同時施工より個別施工の方が有利となった。さらに、阪神高速の全線を個別施工と同時施工の範囲に分類し、同時施工を考慮することによるコスト削減効果を調べたところ、阪神高速全線でのコスト削減額は年間375億円に達する結果となった。各費用に着目すると、0.8億円/年の直接費用の増加で376億円/年もの外部コストを削減する結果となり、同時施工の有効性を確認することができた。

阪神高速では、交通量の多い大阪の路線を中心に通行止めによる大規模な集中工事を実施している。今回の検証では、渋滞の予測精度の問題から集中工

事の有効性を直接評価することができなかったが、大阪中心部では渋滞損失が非常に大きいことから、可能な限り広範囲で同時施工を行うことが有効と考えられ、現在行っている集中工事の有効性を定性的に裏付ける結果が得られた。

付録 多段階指数劣化ハザードモデル

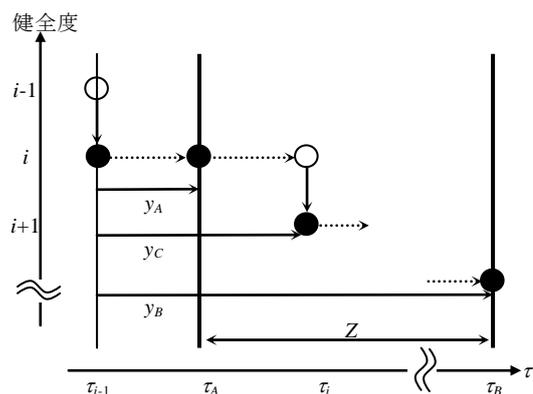
ここでは、劣化曲線の推計に用いた多段階指数劣化ハザードモデルを簡単に紹介する。詳細は文献⁹⁾を参照していただきたい。

(1) ハザードモデル

部材の劣化過程を図-7に示すようにモデル化する。いま、時刻 τ_i (時点 y_c)において、健全度が i から $i+1$ に推移すると考える。部材の健全度が時点 y_i まで状態 i で推移し、かつ期間 $[y_i, y_i+\Delta y_i]$ に水準 $i+1$ に進展する条件付き確率は次の(1)式で表される。

$$\lambda_i(y_i)\Delta y_i = \frac{f_i(y_i)\Delta y_i}{\tilde{F}_i(y_i)} \quad (1)$$

ここで、 f_i は健全度 i の寿命の確率密度関数であり、 $\tilde{F}_i(y_i)$ は健全度が i のまま推移する確率で、時点 i までに健全度が i から $i+1$ 変化する累積確率 $F_i(y_i)$ を用いて $\tilde{F}_i(y_i)=1-F_i(y_i)$ と表される。いま、対象とする部材の健全度が時点 y_i まで状態 i で推移し、かつ時点 y_i で $i+1$ に推移する確率密度関数 $\lambda_i(y_i)$ をハザード関数と呼ぶ。



注)カレンダー時刻 τ_{i-1} に健全度が $i-1$ から i に変化した場合、検査が行われる時刻 τ_A 、 τ_B は時刻 τ_{i-1} を基点とするサンプル時点 y_A 、 y_B と対応する。図中の劣化サンプルパスの場合、時点 y_c に健全度が1つ進行する。定期検査スキームの場合、時刻 τ_{i-1} を観測できないため、サンプル時間軸上の時点 y_A 、 y_B 、 y_C も観測できない。しかし、 $z=y_c-y_A \in [0, Z)$ であるという情報を用いることができる。

図-7 劣化過程のモデル化

(2) 指数ハザードモデル

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に依存せず、常に一定値 $\theta_i > 0$ をとると仮定すると、次の(2)式に示す指数ハザード関数が成立する。

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

(3) マルコフ推移確率

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 π_{ij} は以下のように整理できる。

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

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

$$\pi_{ij} = \sum_{k=i}^j \prod_{m=i}^{k-1} \frac{\theta_m}{\theta_m - \theta_{m+1}} \prod_{m=k}^{j-1} \frac{\theta_m}{\theta_{m+1} - \theta_k} \exp(-\theta_k Z) \quad (j=i, \dots, J) \quad (3c)$$

$$\pi_{iJ} = 1 - \sum_{j=i}^{J-1} \pi_{ij} \quad (i=1, \dots, J-1) \quad (3d)$$

式(3a)-(3d)に示すように、マルコフ推移確率は検査間隔 Z に依存する。ここで、指数ハザードモデルを用いて算出した推移確率は時間的整合性条件を満足することが理論的に保証されており、推移確率(3a)-(3d)に含まれる検査間隔 Z の値を変化させることにより、任意の時間間隔 Z に対してマルコフ推移確率を求めることができる。

(4) ハザードモデルの推計方法

検査サンプル $k(k=1, \dots, J-1)$ には、2個の連続する定期検査が実施された時刻 t_A^k と t_B^k と、各検査で計測された部材の健全度 $h(t_A^k)$ 、 $h(t_B^k)$ が記録されている。これより、検査間隔は $Z^k = t_B^k - t_A^k$ で求められる。次に、劣化推移パターンに基づいて、(4)式のダミー変数 δ_{ij}^k を定義する。

$$\delta_{ij}^k = \begin{cases} 1 & h(t_A^k)=i, h(t_B^k)=j \text{の時} \\ 0 & \text{それ以外の時} \end{cases} \quad (4)$$

さらに、劣化速度に影響を及ぼす構造特性や使用環境を表す特性ベクトルを $x^k = (x_1^k, \dots, x_M^k)$ と表す。これより、定期検査で獲得できる情報は $\Xi^k = (\delta_{ij}^k, Z^k, \bar{x}^k)$ である。記号「 $\bar{\quad}$ 」は実測値であることを示す。

確率推移 π_{ij} を目視検査における実測データ (\bar{Z}^k, \bar{x}^k) と未知パラメータ $\beta = (\beta_1, \dots, \beta_{J-1})$ の関数として $\pi_{ij}(\bar{Z}^k, \bar{x}^k; \beta)$ と表す。いま、 K 個の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

度関数を次の(5)式と表される。

$$\ln[L(\beta)] = \ln \left[\prod_{i=1}^{J-1} \prod_{j=i}^J \prod_{k=1}^K \left\{ \pi_{ij}(\bar{Z}^k, \bar{x}^k; \beta) \right\}^{\delta_{ij}^k} \right] \\ = \sum_{i=1}^{J-1} \sum_{j=i}^J \sum_{k=1}^K \delta_{ij}^k \ln \left[\pi_{ij}(\bar{Z}^k, \bar{x}^k; \beta) \right] \quad (5)$$

ここで、検査データ $=\delta_{ij}^k, \bar{Z}^k, \bar{x}^k$ はすべて確定値であり、対数尤度関数は未知パラメータ β の関数である。ここで、対数尤度関数は未知パラメータ β の関数である。ここで、(5)式の対数尤度関数を最大にするようなパラメータ値 β の最尤推定値は、次の(6)式を同時に満足するような $\hat{\beta} = (\hat{\beta}_{1,1}, \dots, \hat{\beta}_{J-1,M})$ として与えられる。

$$\frac{\partial \ln[L(\hat{\beta})]}{\partial \beta_{i,m}} = 0, \quad (i=1, \dots, J-1; m=1, \dots, M) \quad (6)$$

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。

【参考文献】

- 1) 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，2005.10.
- 2) 有馬ほか：「保全情報管理システム」の開発と運用，阪神高速道路公団 技報第22号，pp.141-148,2005.
- 3) 阪神高速道路：道路構造物の補修要領 第3部 舗装・伸縮継手・塗装，2005.4.
- 4) 閑上，西林，片山：阪神高速道路における橋梁マネジメントシステムの検討について，土木学会第60回年次学術講演会概要集，6-196,2005.9,pp391-392.
- 5) 片山，西林，閑上：阪神高速道路における橋梁マネジメントシステムについて，第26回日本道路会議論文集，No.11007, 2005.10
- 6) 中林，西岡，小林：阪神高速道路の維持管理の現状と課題，土木学会論文集F, Vol. 63, No.4, pp.494-505, 2007
- 7) 石井，田名部：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回日本道路会議論文集，No.12950, 2005.11.
- 8) 飯島，今井，猪俣：MCIによる舗装の供用性評

- 価, 土木技術資料, Vol.23, pp.577-582, 1981
- 9) 津田, 貝戸, 青木, 小林: 橋梁劣化予測のためのマルコフ推移確率の推計, 土木学会論文集, Vol. 801/I-73, pp.69-82, 2005
- 10) 建設省道路局, 建設省土木研究所: 舗装の管理水準と維持修繕工法に関する総合的研究, 第 41 回建設省技術研究報告, pp362-381, 1987.
- 11) 安崎, 片倉, 伊佐: 舗装の供用性と車両走行費用に関する検討, 第 18 回日本道路会議論文集, pp710-711, 1989.

The Effect of Simultaneous Pavement Repair in Urban Highway Network

By Yasuhito SAKAI, Yuji INOUE and Kiyoshi KOBAYASHI

The repair range must be appropriately decided for effective pavement management. Pavement deterioration depends on its location, therefore it is optimal to repair only deteriorated place (independent repair policy), if life cycle cost is composed of only repair cost. However, sometimes, deteriorated place and not-deteriorated place are simultaneously repaired (simultaneous repair policy), because of traffic delay during repair activities. This paper consider traffic delay cost during pavement repair in life cycle cost, and describe the effect of simultaneous repair policy. As a result of case study implemented to Hanshin Expressway, simultaneous repair policy is optimal when traffic delay occurs, but independent repair policy is optimal when traffic delay does not occur. Simultaneous repair policy decreased 37.5 thousand billion yen per a year of its life cycle cost.