

2020年9月28日

第17回 新都市社会技術セミナー

橋梁補修施策プロファイリング手法の開発

大阪大学大学院

貝戸清之

kaito@ga.eng.osaka-u.ac.jp

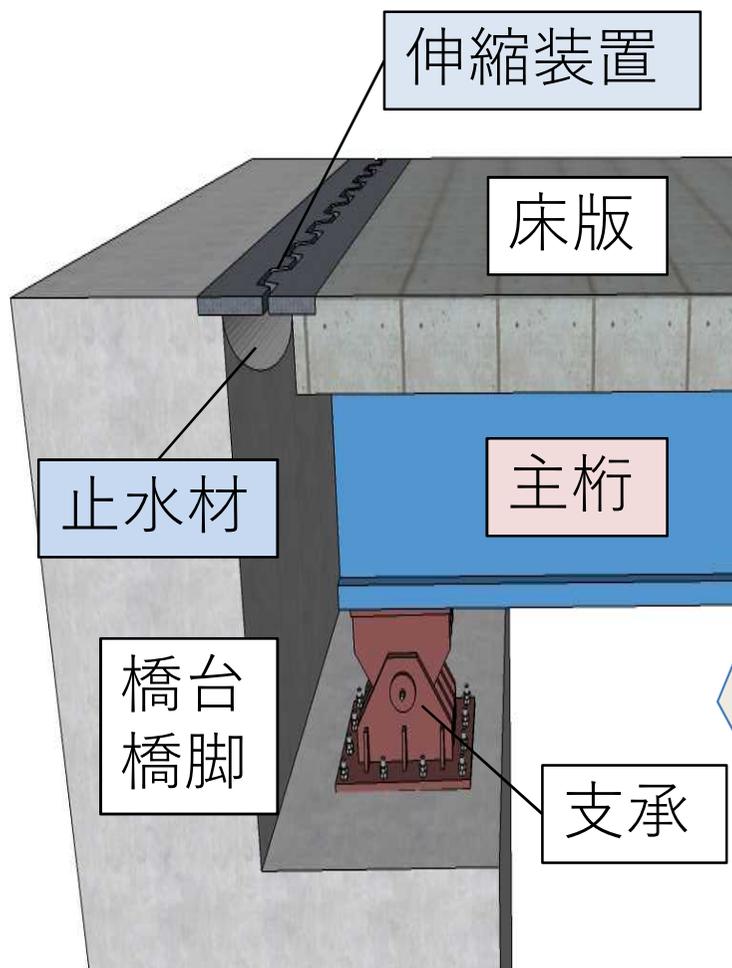
5年に一度の近接目視点検が義務化され、橋梁を対象とした目視点検データが蓄積されてきている。目視点検に代替し得る新技術の開発も進むなか、今後は長年にわたって蓄積された膨大な点検ビッグデータを実務的課題の解決や、アセットマネジメントの継続的稼働に向けて、どのように活用していくかが重要となってくる。申請者らの研究グループでは過去15年間、点検データを用いた劣化予測やライフサイクル費用に基づいた橋梁の最適補修計画の策定に取り組んできた。しかし、多くの管理者では予算・人員制約のために、全橋梁を対象に劣化曲線を作成し、厳密にライフサイクル費用最小化計画を立案することに実務的な意味を持たない。むしろ、劣化特性や損傷の種類に基づいて橋梁をグループ化し、グループ内における補修施策の標準化と、グループ間における補修施策の差別化を通じた補修施策プロファイリングを行うことが望ましい。

本研究プロジェクトでは、橋梁部材の目視点検データの統計分析を通して、劣化要因を特定するとともに、その劣化要因を説明変数として内包するような劣化予測モデルを用いた劣化速度の異質性のモデル化と、劣化速度の異質性に着目した補修施策の統計的プロファイリングのための方法論を提示する。さらに、近畿地方整備局管内の橋梁群を対象とした補修施策プロファイリングによって提案手法の妥当性を実証的に確認する。

近畿地方整備局管内の橋梁を対象とした目視点検データを統計分析することによって、主要部材と、その劣化の主要因を抽出する。また主要部材の劣化過程と部材間の関連性などをマルコフ劣化ハザードモデルを拡張する形でモデル化する。さらに、ベンチマーク分析を通して、劣化の主要因では説明できない個別橋梁の劣化速度の異質性を定量的に評価する。



- ・伸縮装置の劣化，鋼桁端部の腐食に着目
- ・2つの劣化事象の関連性を考慮した統計的劣化予測モデルの構築



鋼桁端部（橋台・橋脚上の鋼製部材）

- 橋台上は狭隘な空間
- 取替には通行規制が付随

物理的かつ社会的な理由により
点検・補修が困難

- 主な劣化事象：腐食

伸縮装置からの漏水

腐食と防食機能の劣化を統合した健全度の設定

橋梁定期点検要領
 板厚減少あり：腐食
 板厚減少なし：防食機能の劣化
 判断が難しい場合は腐食

健全度	腐食		健全度	防食機能の劣化
	一般的状況			一般的状況
	損傷の深さ	損傷の面積		
1	損傷なし		1	損傷なし
2	小	小	2	最外層の防食塗装に変色が生じたり、局所的なうきが生じている。
3	小	大	3	部分的に防食塗装が剥離し、下塗りが露出している。
4	大	小	4	点錆が発生している。
5	大	大		



健全度	防食機能の劣化と腐食
	一般的状況
1	損傷なし
2	最外層の防食塗装に変色が生じたり、局所的なうきが生じている。
3	部分的に防食塗装が剥離し、下塗りが露出している。
4	点錆が発生している。
5	深さ：小，面積：小
6	深さ：小，面積：大
7	深さ：大，面積：小
8	深さ：大，面積：大

主桁（端部・支点）の点検記録

1回目：14,785（526橋），2回目：10,070（426橋），3回目：2,055（99橋）



伸縮装置との位置属性が整合した点検記録

1回目：3,819（311橋），2回目：2,452（229橋），3回目：583（66橋）



補修履歴を追加

249(44橋)

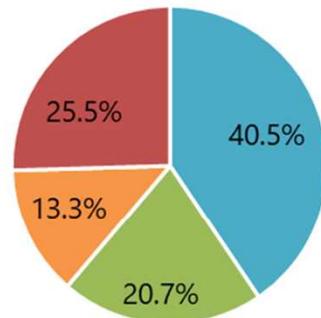


点検間・点検と補修間の健全度の推移をサンプルとする

1,850サンプル（177橋）

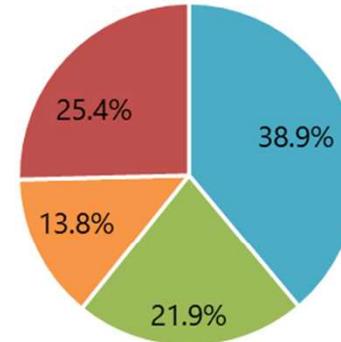
桁中間と桁端部の健全度の分布

防食機能の劣化（中間）



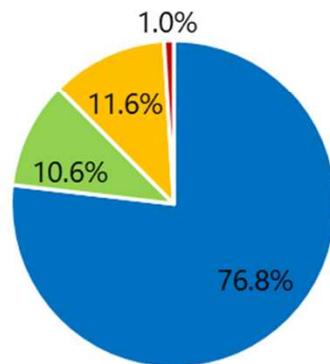
■ 健全度1 ■ 健全度2 ■ 健全度3 ■ 健全度4

防食機能の劣化（端部）



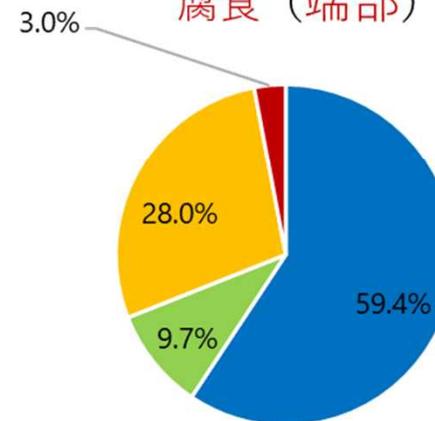
■ 健全度1 ■ 健全度2 ■ 健全度3 ■ 健全度4

腐食（中間）



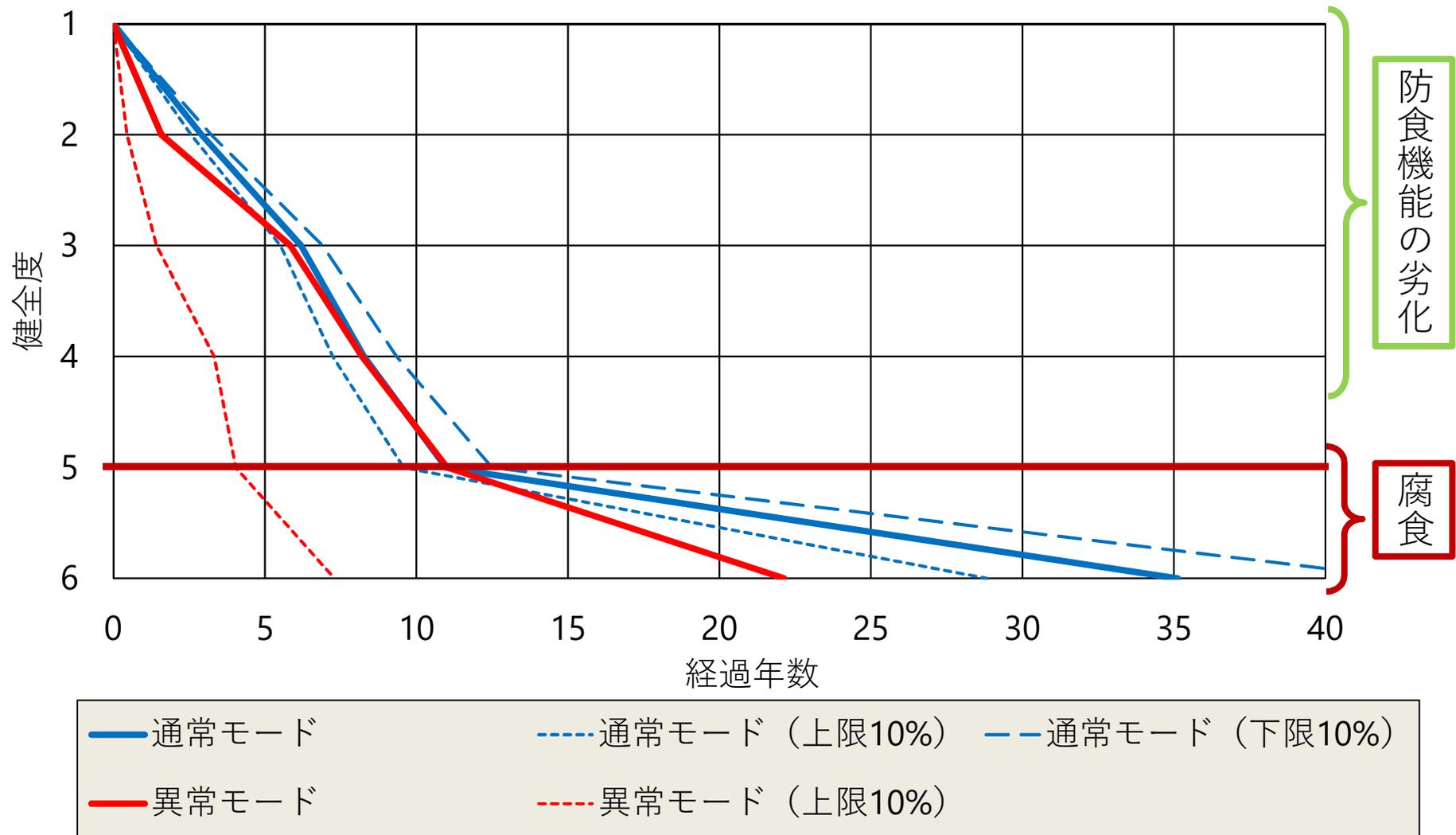
■ 健全度5 ■ 健全度6 ■ 健全度7 ■ 健全度8

腐食（端部）



■ 健全度5 ■ 健全度6 ■ 健全度7 ■ 健全度8

防食機能の劣化と腐食の進展過程



1年目の研究成果概要

実際の目視点検データを用いた統計的劣化予測により桁端部における腐食に対する寿命を約12年と推計した。その結果、これまでの塗装の塗り替え周期（10年～15年）が実現象との比較を通して妥当性であることを確認できた。また、伸縮装置の破損による漏水が桁端部の腐食を加速していることを明らかにするとともに、伸縮装置のように主部材ではない部材であったとしても、主部材の劣化・損傷に多大な影響をもたらす場合があることから、今後点検周期を検討していく際には、部材間の関係性も考慮しなければならないことを示唆した。

一方で、桁端部と伸縮装置のように、複数部材間の関係性を分析する際には、対象となる桁端部に影響を及ぼす伸縮装置はどれかということデータベースで把握できるような部材IDの設定法（コーディング手法）を考えておく必要がある。例えば、RC床版の劣化と直上のポットホールが発生との間には相関関係があることが経験的に知られている。今後RC床版の劣化と、床版直上のポットホールの対応関係を調べる際には、床版パネル（床版の点検、維持管理の基本単位）とキロポスト（ポットホールの点検、維持管理の基本単位）を紐づけることができるようなコーディング手法の開発が重要である。

橋梁部材の中でも最重要部材であるRC床版に着目し、目視点検データに基づくベンチマーク分析を通して、劣化の主要因では説明できない個別橋梁の劣化速度の異質性を定量的に評価する。想定され得る補修シナリオの立案とライフサイクル費用評価手法を検討する。また、劣化速度の異質性、あるいは異質性間の相関構造に基づく統計的プロファイリング手法の開発を行う。

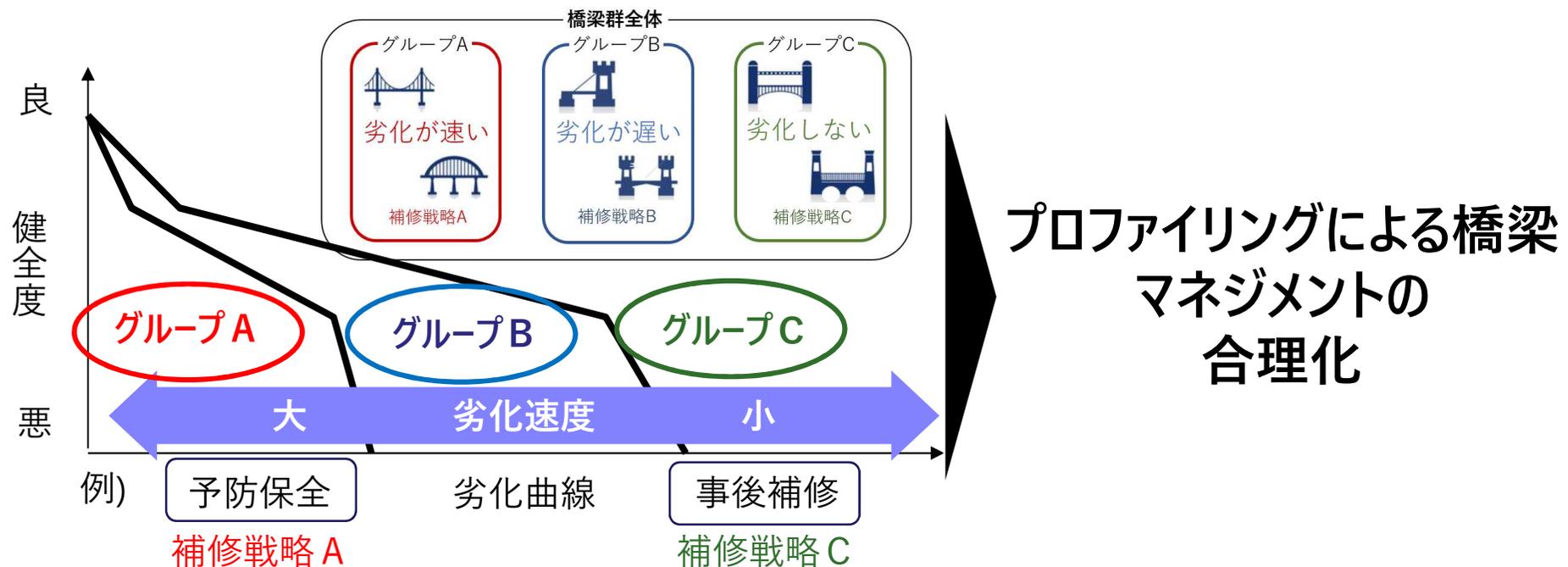


- RC床版の劣化過程に着目
- 劣化速度の異質性に基づくプロファイリング手法の開発

研究目的

実務的課題に対するアプローチ

- 劣化特性や損傷の種類に基づいたグループ化による補修施策の標準化
- グループ間における補修施策の差別化

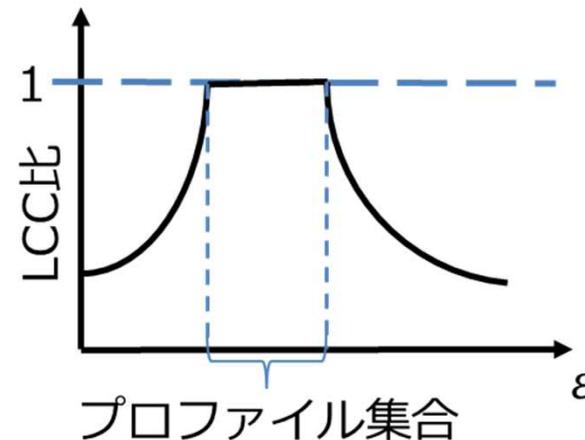


橋梁補修プロファイリング施策手法の開発

橋梁補修施策プロファイリング

- 混合マルコフ劣化ハザードモデルを用いて、橋梁の劣化速度の差異により各橋梁の劣化曲線を算出
- 平均費用法を用いて各橋梁に対する最適補修戦略となるLCCと全体の橋梁の最適補修戦略となるLCCの比により、同一グループ内で採用する補修戦略を統一化

LCC比 =
$$\frac{\text{各橋梁のLCC費用最小となる補修戦略}}{\text{対象橋梁群全てに同一の補修戦略を適用した時 LCC費用最小となる補修戦略}}$$



プロフィール集合に含まれなかった橋梁

→ 全体橋梁のLCC費用がその次に小さくなる補修戦略を分母として

再びプロファイリング、各グループでの補修戦略を差別化

研究対象部材（RC床版）の概要

研究対象部材：重要部材の1つであるRC床版の一般部



要素番号： (数字)

※点検が実施される単位

点検回数	1回～3回
点検年	2006年～2015年
供用開始年	1954年～2003年
所在	京都府，滋賀県， 大阪府，兵庫県， 和歌山県
主な損傷	床版ひび割れ

**損傷の記述が多い床版ひび割れに着目した
 プロファイリングの実施**

国土交通省近畿地方整備局管内の橋梁点検データを適用

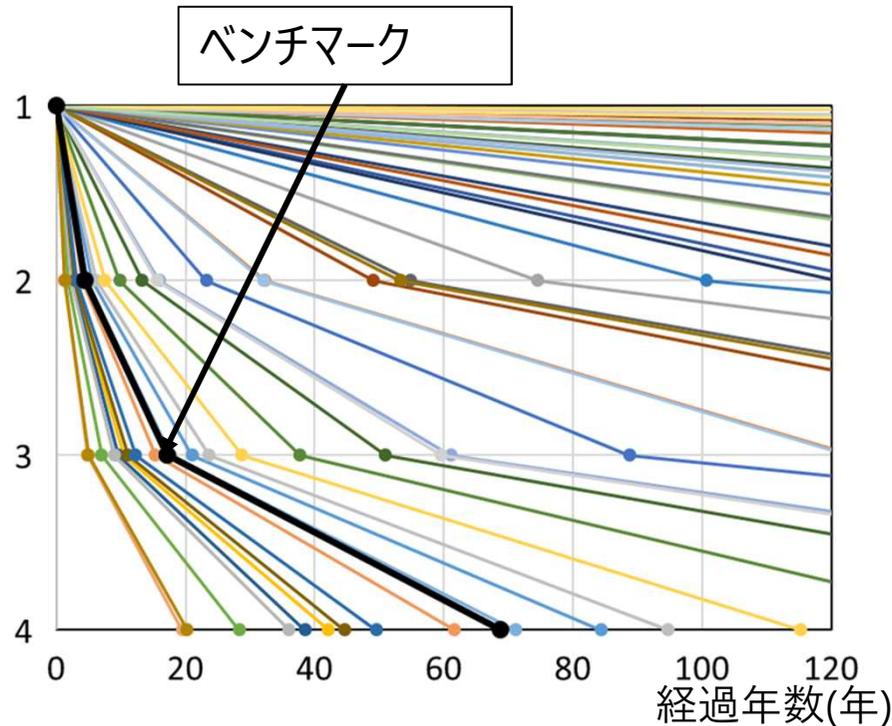
床版ひび割れデータ概要

		事後健全度						
		1	2	3	4	5		
橋梁数	342	事前健全度	1	4,710	793	351	25	1
サンプルサイズ	33,371		2	0	18,459	1,913	348	1
損傷段階	5 段階		3	0	0	5,246	579	1
			4	0	0	0	940	1
			5	0	0	0	0	3

- ❑ 劣化曲線の算出は上記データから
京都国道事務所管内の橋梁（全54橋）を対象とした
- ❑ 健全度 5 に関するサンプルが少数であるため
推計上では健全度 5 を 4 とまとめた 4 段階評価を実施

床版ひび割れを対象とした推定結果

劣化曲線は橋梁 i ($i = 1, 2, \dots, 54$)のRC床版部材の期待寿命



ϵ 推計結果
 最大値 (劣化が速い)
 : 3.5236
 最小値 (劣化が遅い)
 : 0.0007

ベンチマーク推定結果

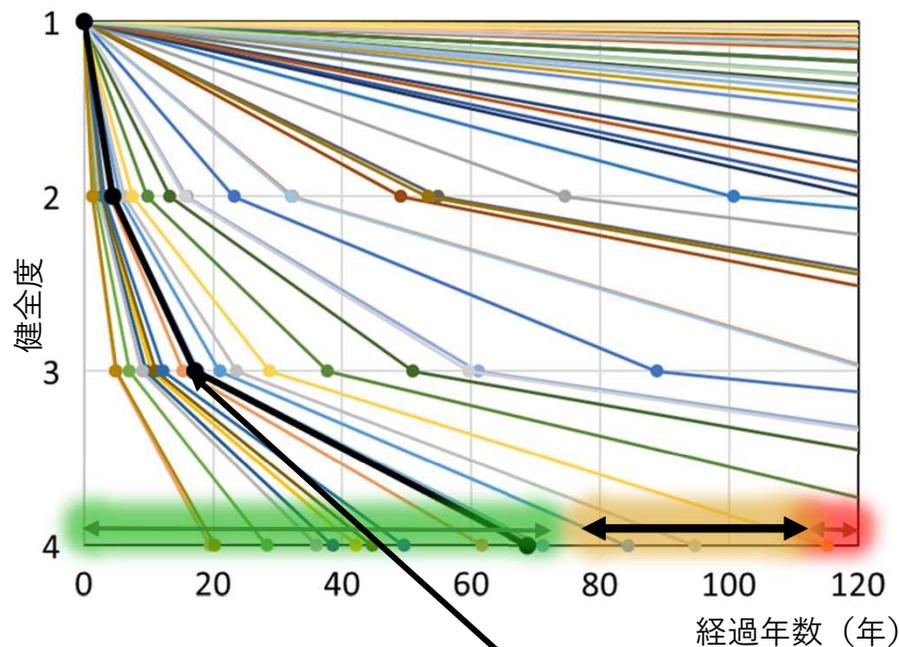
健全度	1→2	2→3	3→4
期待寿命 (年)	4.48	12.64	51.59
累積期待寿命 (年)	4.48	17.13	68.72

補修戦略 (RC床版を例として)

ベンチマーク推定結果

健全度 s	推定値 β	期待寿命 (年)
1	-1.50	4.48
2	-2.53	17.13
3	-3.94	68.72

橋梁 $i(i = 1, \dots, 54)$ RC床版部材の期待寿命



ベンチマーク

設定した補修概要

各補修工法は補修後の効果が不明確なため
健全度は1まで回復すると仮定

補修時健全度	補修工法	補修単価 (千円/m ²)	健全度回復水準
2	ひび割れ注入工法	約20	1
3	断面修復工法	約29	1
4	鋼板接着工法	約60	1
5	床版取替工法	約550	1

補修時健全度	補修戦略C (0.84 ≤ ε)	補修戦略B (0.15 ≤ ε ≤ 0.84)	補修戦略A (ε ≤ 0.15)
2	○	×	×
3	○	×	×
4	×	×	○
5	○	○	○
平均費用値	80.87	99.56	71.63
対象橋梁数	10	8	36

橋梁IDと橋梁名の対応

橋梁ID	劣化速度 (ϵ)	橋梁名	管轄事務所
134	3.52	A橋	京都国道
586	3.39	B橋	福知山河川国道
586	3.39	C橋	福知山河川国道
78	2.42	D橋	福知山河川国道
96	1.90	E橋	福知山河川国道
80	1.78	F橋	福知山河川国道
74	1.62	G橋	福知山河川国道
129	1.53	H橋	京都国道

劣化速度の大きい橋梁に対して、相関係数を考慮し劣化要因の分析を実施

劣化要因の突き合わせ

橋梁概要		起点側	緯度: 35.22314 経度: 135.22497	終点側	緯度: 35.22344 経度: 135.22497	橋梁ID	35.22314.135.22497
フリガナ 橋梁名称		完成年度	1964		近畿地方整備局		
路線名	一般国道9号 現道	所在地	自 京都府福知山市三和町寺尾小字権現	距離標	自 百米標69.0km + 距離09m	管轄	福知山河川国道事務所
橋梁番号	8635009037	至	京都府福知山市三和町芦洲小字橋詰	至	百米標69.0km + 距離09m		福知山国道維持出張所

帳票更新年月日 2015年03月20日

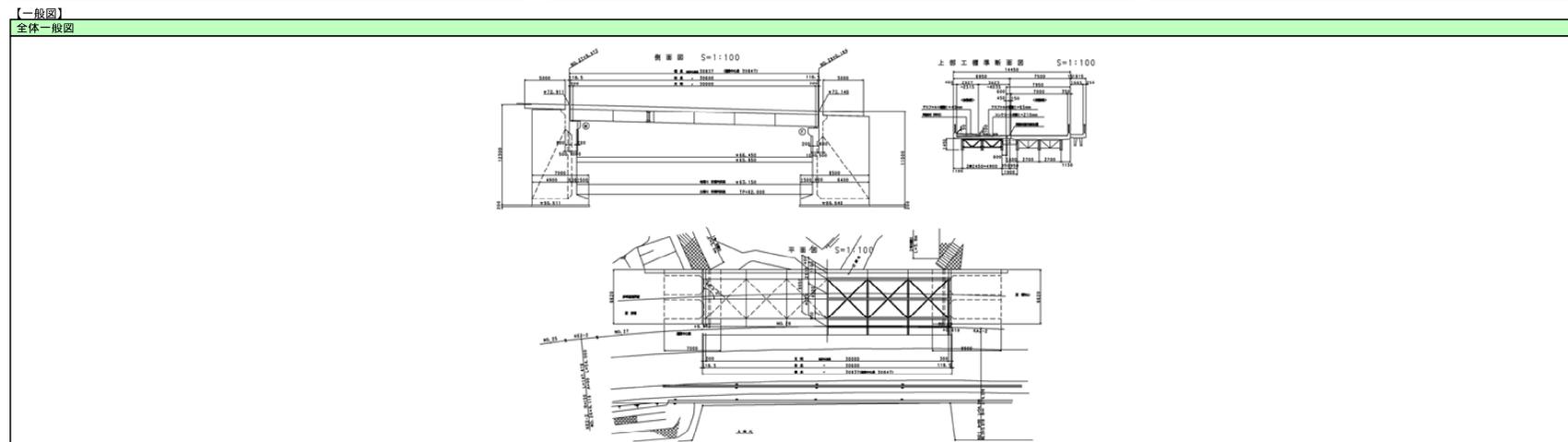
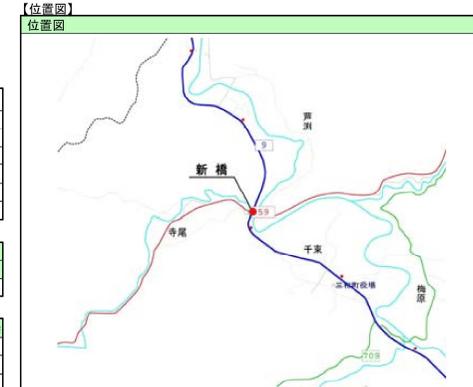
【橋梁諸元】		橋梁区分	本線橋	橋梁形式	単純合成鋼桁橋	等級	I等橋	設計活荷重	T.L - 20
橋梁種別	橋	橋長(m)	30.850	設計震度	0.20	上部構造	昭和31年 鋼道路橋設計示方書	設計震度	0.20
分割区分	上下線一体	橋面積(m ²)	422.6	施工会社	上部構造 宇野重工株式会社	下部構造	昭和33年 コンクリート標準示方書	荷重制限(tf)	
事業区分	一般道路	総径間数	1	荷重制限	無し	通行制限	無し	迂回路有無	無し
架橋状況	河川・開水路・湖沼	平面形状	直橋(直角橋)						
文差物名称	寺尾川	平面線形(m)							
塩害地域区分	D	縦断勾配(%)	2.500						

【幅員構成】		左側(m)										中央帯	分離帯	右側(m)			
全幅員(m)	有効幅員(m)	地覆幅	地覆高さ	歩道幅	路肩幅	車線幅	車線数	中央帯(m)	分離帯(m)	車線数	車線幅	路肩幅	歩道幅	地覆高さ	地覆幅		
14.45	13.70	0.40	0.05	2.93	0.25	5.14	1.00	0.00	0.00	1.00	5.14	0.25	0.00	0.25	0.35		

【上部構造】		構造体番号	主桁材料区分	支間長(m)	桁高(m)	桁本数	上部構造形式	路面位置	床版材料区分	床版厚(cm)	床版形式	防水工有無
1	鋼	30.000m	1.45	6	単純鋼合成版桁橋	上路橋	コンクリート系	21.0	場所打床版			

【下部構造】		躯体番号	下部構造材料区分	下部構造高(m)	下部構造形式	基礎材料区分	基礎構造形式	杭径(m)	杭本数	支承形式
A1	R C	12.30	控え壁式橋台				直接基礎			可動ゴム支承
A2	R C	11.50	控え壁式橋台				直接基礎			固定ゴム支承

【添架物】					【塗装仕様等】				
添架物区分	種別	寸法	本数	管理者	塗装	点検施設	排水施設	遮音壁の有無	高欄種別
自管理添架物	通信ケーブル等	0303	9	国土交通省	プライマー 下塗り塗料 中塗り塗料 上塗り塗料	点検施設無し	たれ流し型式	有り	高欄、防護柵



劣化要因の突き合わせ

様式-3-3

総合検査結果		起点側	緯度: 35.22314 経度: 135.22497	終点側	緯度: 35.22344 経度: 135.22497	橋梁ID	35.22314, 135.22497
フリガナ 橋梁名称		完成年度	1964		近畿地方整備局		
路線名	一般国道9号 現道	所在地	自 京都府福知山市三和町寺尾小字権現	距離標	自 百米標69.0km + 距離69m	管轄	福知山河川国道事務所
橋梁番号	8635009037		至 京都府福知山市三和町芦洲小字橋誌		至 百米標69.0km + 距離99m		福知山国道維持出張所

帳票更新年月日 2015年03月20日

履歴一 覧番号	年月日	種別・名称	総合検査結果	健全度 (橋単位)	代表対策 区分
1	2005年03月31日	定期点検 (初回)	本橋は供用後41年経過した単純合成鉄桁橋である。両橋台には下部工検査路が設置されている。これまでに、支承の補修工事が実施されており、概ね健全である。また、耐震補強として、落橋防止構造及び変位制限装置が設置されている。橋梁全体の損傷状況は、伸縮装置の変色・劣化を除いては、種々の損傷はあるものいずれも「状況に応じて補修する必要がある」程度の損傷である。 以下、主要な損傷についてその原因、進行性、対策区分について記述する。 (1) 経年劣化により伸縮装置の止水不良により変色・劣化が発生している。漏水箇所は限定されており、支承、桁端部とも腐食程度は小さいが、このままでは主構造及び支承の腐食環境促進の要因となるため「速やかに補修を行う必要がある」とした。		
2	2009年11月17日	定期点検	本橋は、供用後45年を経過した単純鋼合成鉄桁橋で、山間の河川上に位置している。橋梁定期点検は、前回平成16年度に行われている。落橋防止システムとして落橋防止ブラケットや沓座拡幅が施されている。再塗装が1997年に行われている。 (1) 損傷と補修・詳細調査の要否 ① 速やかに補修する必要がある損傷 (C) 【腐食】支承本体、アカボリ、伸縮装置【変色劣化】伸縮装置 特になし ② 詳細調査が必要な損傷 (S) 特になし (2) 対策区分S(経過観察)、B、M ① 経過観察が必要な損傷 (S) 特になし ② 状況に応じて補修する必要がある損傷 (B) 【腐食】【防食機能の劣化】主桁、横桁、落橋防止システム、排水ます【腐食】縦桁【防食機能の劣化】対傾構、下横構、支承本体、アカボリ、伸縮装置、防護柵【ひびわれ】胸壁、堅壁【剥離・鉄筋露出】床版、堅壁、落橋防止システム【うき】床版、堅壁、落橋防止システム【床版ひびわれ】床版【変形・欠損】落橋防止システム【漏水・滲水】堅壁、橋台その他【漏水・遊離石灰】床版、堅壁、胸壁、翼壁、地覆【その他(錆汁)】胸壁【その他(すり傷)】防護柵【その他(遊離石灰付着)】点検施設 ③ 維持工事で対応する必要がある損傷 (M) 【土砂詰り】橋台その他、伸縮装置【その他(目地材の脱落)】伸縮装置 (3) 特記事項 ・本橋は、伸縮装置の止水不良による漏水で、支承本体、アカボリが腐食が激しい。速やかに補修が必要である。その他の部材は、状況に応じて補修する損傷及び維持工事で対応する損傷がある程度である。		B
3	2012年12月20日	補修工事	工事名 : 国道9号管内橋梁補修工事 施工業者 : 横河工務株式会社 設計会社 : 調査未記入 対象部材 : 伸縮装置、支承 補修・補強工法 : 伸縮装置の更新(上り線のみ)、支承防錆(金属溶射) ※ ・補修・補強工事調書より、カルテの更新を行った。前回点検で「C」判定となっている支承腐食、伸縮装置の劣化損傷については今回の工事により補修されており見えし処理を行った。		B
4	2014年10月31日	定期点検	本橋は供用開始から約50年が経過した単純合成鉄桁橋であり、桁下は河川である。下り側に歩道部を有しており、上り側には新橋側歩道橋(上)が隣接し、両側に歩道部を有する橋面構成となっている。本橋は上り側が既設部で、1996年に下り側が拡幅されて一体構造となったものである。 前回塗装は上り側が1991年10月で約23年が経過し、下り側が1997年3月で約17年が経過している。 前回点検(2009年度)では、「C」および「S」判定の損傷はなかった。 (1) 対策区分判定結果 : ()内は対策工法案 【C1】予防保全の観点から速やかに補修等を行う必要がある損傷 : なし 【C2】橋梁構造の安全性の観点から速やかに補修等を行う必要がある損傷 : なし 【S1】詳細調査の必要がある損傷 : なし 【S2】追跡調査の必要がある損傷 : なし 【B】状況に応じて補修する必要がある損傷 : 主桁の腐食、横桁の腐食、床版ひびわれ、胸壁および堅壁のひびわれ、堅壁の遊離石灰、地覆のひびわれ、その他調書その10およびその11参照 【M】維持工事で対応する必要がある損傷 : なし (2) 特記事項 上り側の終点近傍の舗装部にポットホールが新たに確認されたが、既に維持工事により修繕されている。損傷箇所の下方の床版には損傷がないことも確認済みであり、車両走行による搬撤れが原因と思われる(「B」判定)。		I B

2年目の研究成果概要

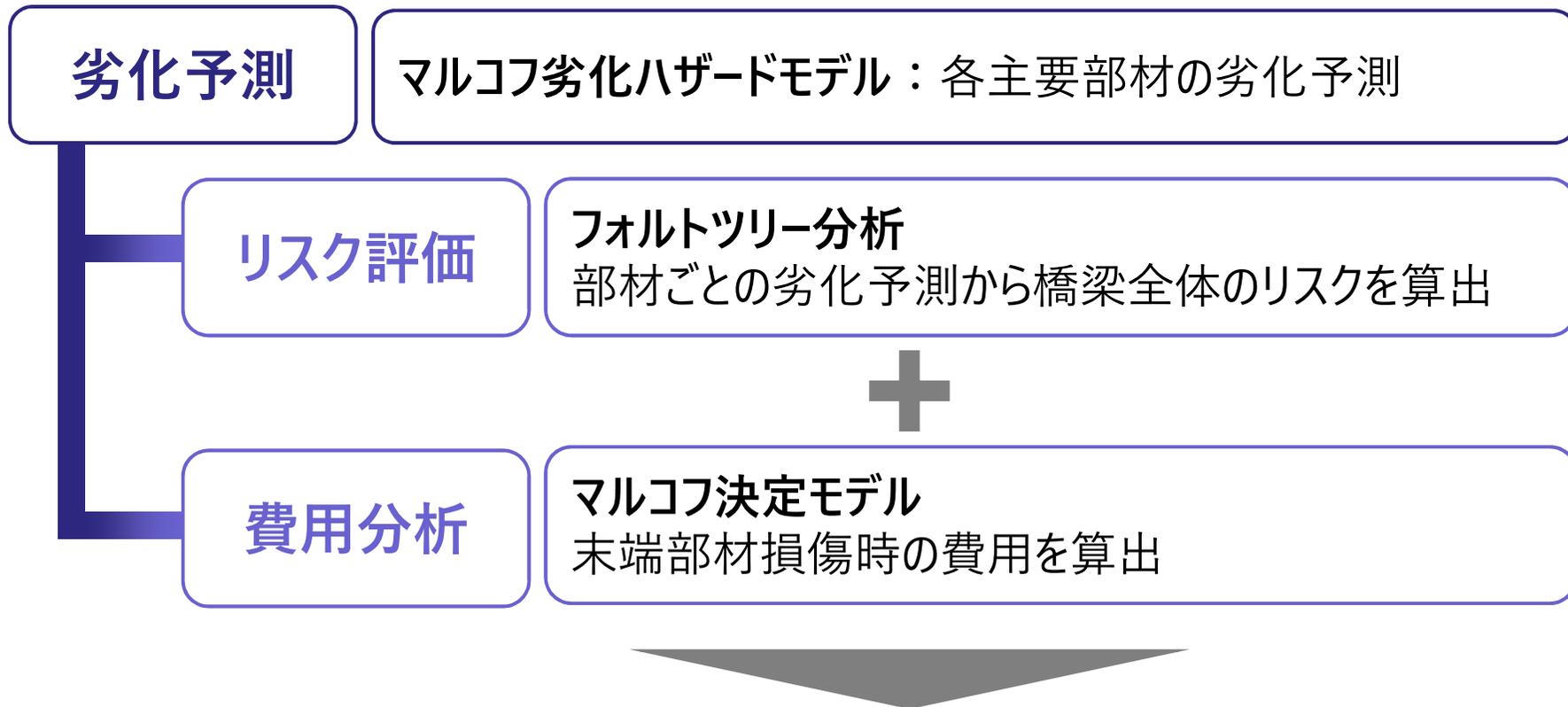
RC床版を中心とした劣化予測，具体的にはベンチマーク分析とプロファイリングを実施して，RC床版の劣化相対比較に基づく補修優先順位の決定を行った。さらに，実際の長寿命化計画における補修優先順位と比較することによって，両者の優先順位に差異が生じていることを確認した。ただし，この差異に関しては実際の補修計画が橋梁の損傷状態のみならず，様々な要因（補修工事のロット，対象橋梁の重要度）を加味した上で総合的に決定されていることから必然的に生じ得るものである一方で，実際の点検データに基づくプロファイリングにより重大な損傷を有する橋梁が補修優先順位で上位にくることを明らかにした。

さらなる実用化に際しては，今回の対象が一部の地域に限定されていたことから適用範囲を拡大するとともに，（すでに実態が把握されているⅢ判定の橋梁ではなく）Ⅱ判定の橋梁群に対する補修優先順位の決定にプロファイリング手法を適用して実務的課題を解決していくことが重要である。またこれと同時にいくつかの条件（例えば，交通量の多寡，一般／雪寒地域など）によって分類されたカテゴリーごとに，劣化予測式や期待寿命の標準モデルや標準値を準備しておくことも実務的には重要である（特に地方自治体など，統計的見地から点検データが十分に蓄積できていない管理者では，単独で劣化予測や寿命評価を行うのが困難であると考えられるため）。

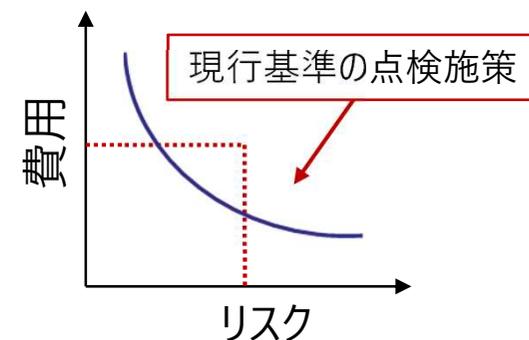
多数の部材による階層的構造を有する橋梁を対象として、橋梁全体としてのリスク評価を実施する。この際に、これまで検討してきた鋼桁端部の腐食やRC床版の損傷を考慮した形の方法論を提案する。また、リスク評価の活用として、実際の実務的課題に対する解決策や技術的提案ができるような検討を行う。



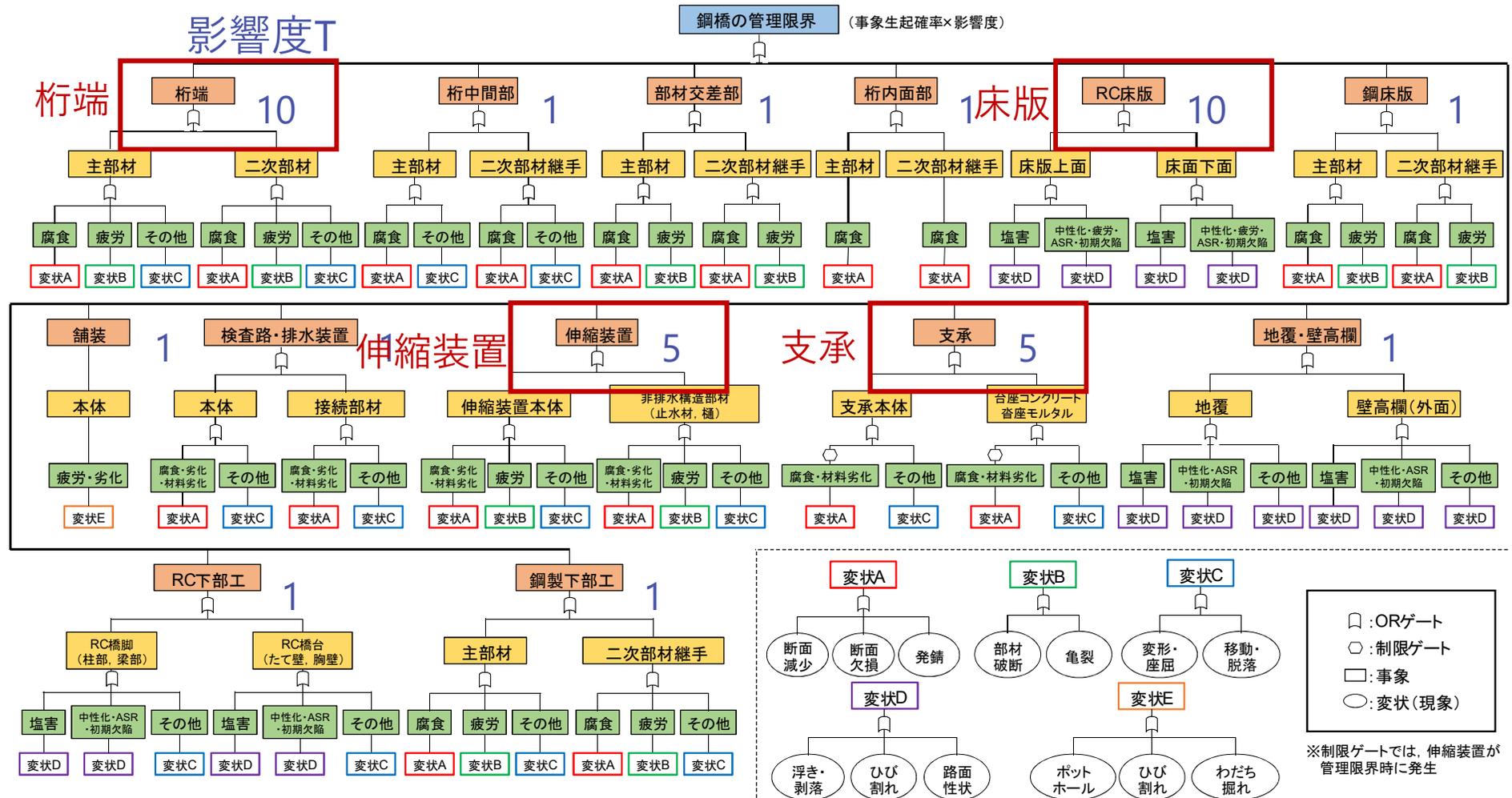
- ・橋梁全体としてリスク評価のためのフォルト・ツリー分析
- ・点検周期の妥当性評価



◆ **リスクと費用のトレードオフ関係について分析**
現行の施策と比較を行う



橋梁におけるフォルトツリーの例



構造的な性能に寄与する割合に応じ影響度を設定

適用データの概要

◆ 桁端：近畿地方整備局管内の
橋梁点検データ

橋梁数	177
サンプルサイズ	1,850
損傷段階	6段階

◆ 床版：近畿地方整備局管内の
橋梁点検データ

橋梁数	342
サンプルサイズ	33,371
損傷段階	4段階

◆ 伸縮装置：近畿地方整備局管内の
橋梁点検データ

橋梁数	123
サンプルサイズ	1850
損傷段階	2段階

◆ 支承：NEXCO西日本が管理するエリアの
橋梁点検データ

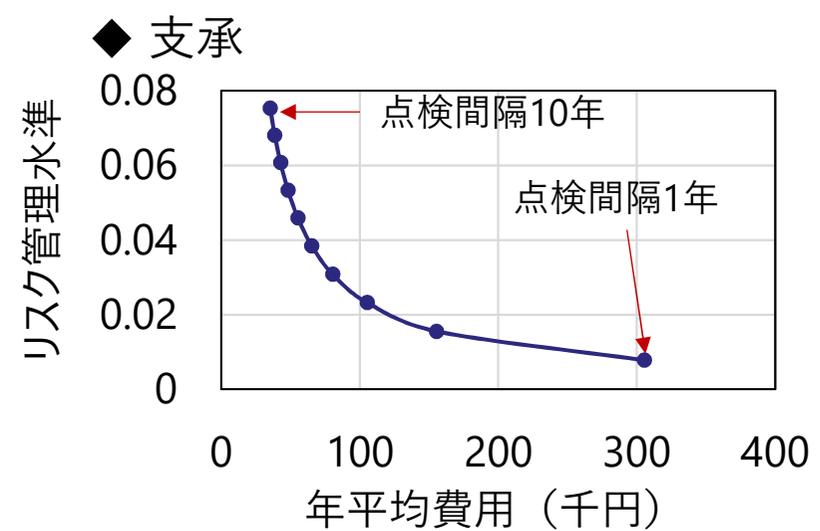
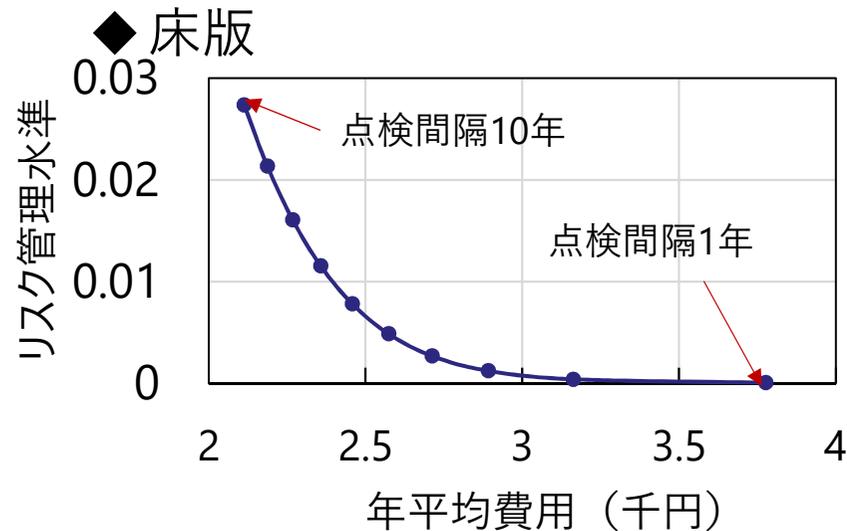
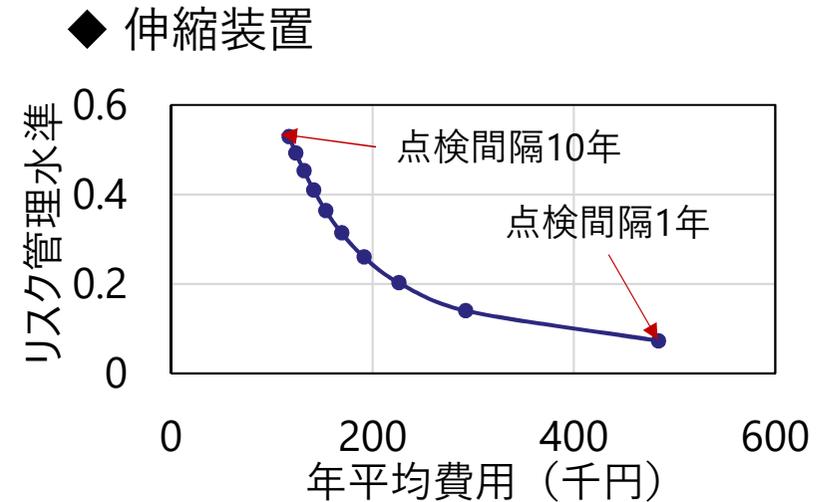
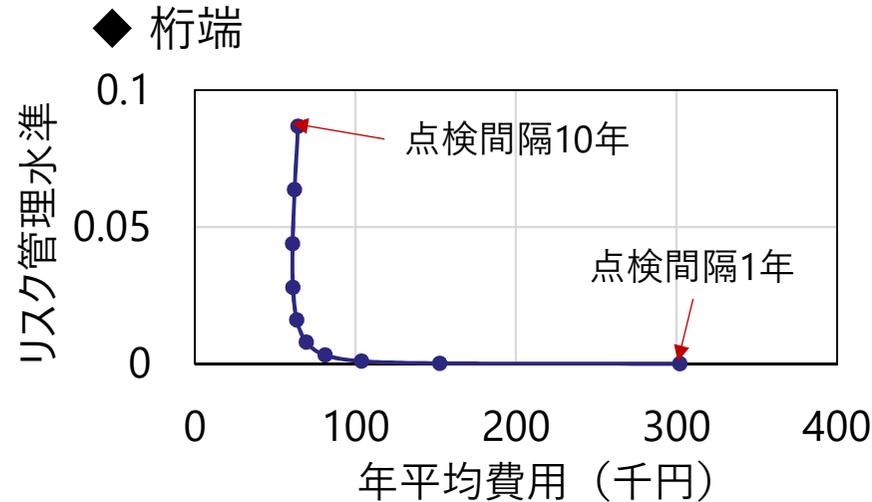
橋梁数	136
サンプルサイズ	4781
損傷段階	3段階

◆ 一橋あたりの部材数（過去の文献を参考）

	桁端	床版	伸縮装置	支承
部材数	16か所	3916m ²	4か所	40か所

各部材のLCC評価

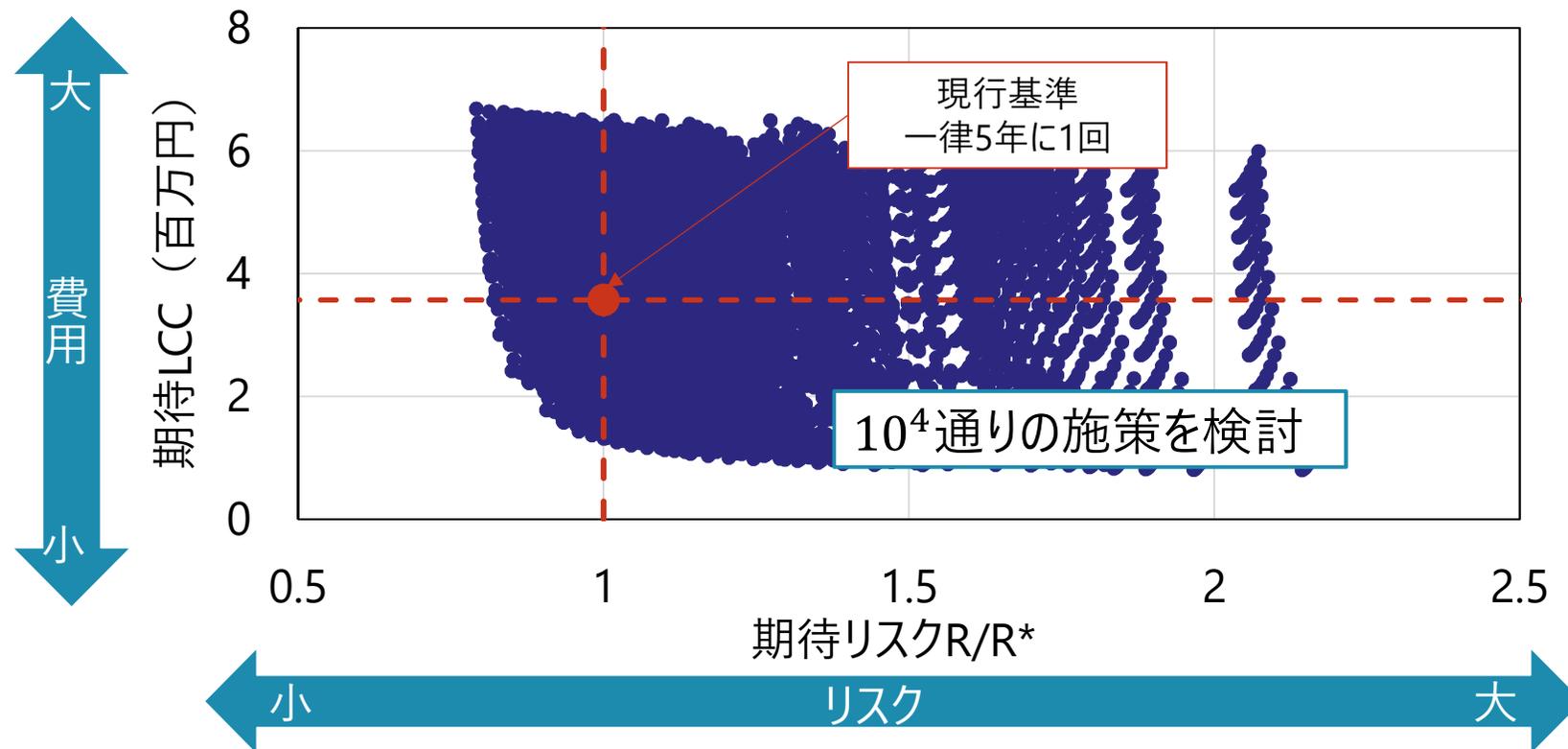
点検頻度を1～10年まで1年単位で変化



各部材の推定結果よりFTAで橋梁全体の推定を行う

リスクコストのトレードオフ関係

- ◆ 補修・点検に要する費用は既往の文献により用いられている値を参照した



- ◆ 提案手法により現行基準の全体の中での位置を確認可能
- ◆ 「期待LCC」と「期待リスク」両観点から優位になる施策の数は**711**通り

現行基準の妥当性とさらに最適化された施策の検討が可能

主要部材のリスク発生確率を要素とする橋梁フォルトツリーを作成して、点検データから橋梁全体のリスク評価手法を開発し、部材ごとに実態に即した点検周期を検討するための方法論を手掛けた。これにより劣化が進行した部材や重要度の高い部材に関しては5年よりも短周期で目視点検を実施する一方で、劣化の進行が遅い部材に関しては5年よりも長周期の目視点検を実施することによって、現行の5年に一度の一括点検よりも費用・リスクともに同時に低下できる可能性があることを示唆した。

さらなる実用化に際しては、フォルトツリーを構成する部材の選定、部材間の重み付けなど、管轄する地域の環境条件や、管理する橋梁の構造条件、使用条件に応じて個々の対応が求められる。また、点検や補修の費用設定によって分析結果に差異が生じてくることから、設定したパラメータの妥当性についても検討しておく必要がある。

◆道路橋維持管理の変遷

2012年12月2日 笹子トンネル天井落下事故

▶社会基盤施設の点検制度確立の必要性



笹子トンネル天井落下事故の様子

<https://www.asahi.com/articles/ASM7S4SLVM7SOIPE00J.html>より引用

2014年7月1日 道路法の改正

▶道路法施行規則（抄）

（道路の維持又は修繕に関する技術的基準等）

点検は **近接目視により5年に回の頻度で行うことを基本とすること**

2019年～

道路法の改正から二巡目の点検

- ①点検員減少により点検が困難に
- ②部材ごとに一律点検周期の妥当性