

現場技術者へのアンケート調査に基づく 高速道路設備の維持管理施策の改善可能性

生嶋 理恵¹・水谷 大二郎²・佐津川 功季³・川崎 洋輔⁴・桑原 雅夫⁵

¹正会員 西日本高速道路エンジニアリング関西株式会社 (〒567-0032 茨木市西駅前町 5-26)

E-mail: r_ikushima@w-e-kansai.co.jp

²正会員 東北大学助教 大学院工学研究科土木工学専攻 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06)

E-mail: daijiro.mizutani.a5@tohoku.ac.jp (Corresponding Author)

³正会員 東北大学助教 未来科学技術共同研究センター (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-10)

E-mail: satsukawa@tohoku.ac.jp

⁴正会員 日本大学専任講師 工学部土木工学科 (〒963-8642 郡山市田村町徳定字中河原 1 番地)

E-mail: kawasaki.yosuke@nihon-u.ac.jp

⁵正会員 東北大学教授 未来科学技術共同研究センター (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-10)

E-mail: kuwahara@plan.civil.tohoku.ac.jp

本研究では、現場技術者へのアンケート調査により、維持管理施策の改善可能性がある高速道路設備（以下、設備）の種類を選定するための方法論を提案する。高速道路管理者は、膨大な種類の設備を維持管理する必要があるが、故障履歴データの詳細な分析などにより、設備ごとに適切な維持管理施策を網羅的に把握するのは困難である。本研究では、日常的に維持管理業務を行う現場技術者に設備の特性に関するアンケート調査を行い、設備の種類ごとに故障特性や故障時の利用者への影響を簡易的に把握する。その上で、提案する方法論により、i) 設備の種類ごとに適切な維持管理施策が把握できること、ii) アンケート調査結果に基づき現状の維持管理施策の改善可能性がある設備のスクリーニングが可能であることを確認する。

Key Words : asset management, questionnaire survey, on-site engineer, expressway facility, screening

1. はじめに

(1) 背景・問題意識・目的

高速道路管理者は、道路利用者の安全性や快適性を確保するために、土木構造物や高速道路設備などの高速道路アセットを、その特性に応じて適切に維持管理する必要がある。2021年5月現在、我が国の高速道路（2021年2月末時点での全長8,431km）において、開通からの経過年数が30年を超える区間は約4割に上る。また、少子高齢化に伴う技術者の減少や税収減少による予算の制約は年々厳しくなる。このような状況において、高速道路アセットへの維持管理の継続的な改善を行い、維持管理費用の削減、アセットの劣化・故障に起因した利用者への影響の低減、高速道路管理者の維持管理業務の省力化を図ってゆくことが求められる。

ETC設備や受配電設備といった高速道路設備（以下、設備）は、土木構造物と比較して、多様な機器や装置により構成されている。そのため、物理的な経年劣化、経済的寿命、突発的な故障、陳腐化など、個々の機器や装置に対して補修が必要となる要因が多岐にわたり、その特性も異なる。また、設備を構成する機器や装置の多様性に起因して、個々の機器や装置が利用不能となった際の交通流への影響や補修の緊急性も異なっている。このような多様な種類の設備に対して、現在は事後保全が広く採用されているが、個々の設備の特性を考慮せず一元的な維持管理施策を設定することは適切ではない。設備の維持管理の継続的な改善を行うためには、設備の種類ごとの劣化・故障特性や、故障が利用者にも与える影響を踏まえ、維持管理施策をより細やかに設定することが必要である。

しかし、ここで問題となるのが、設備の維持管理を計

画・実施する際に、計画する主体と実施する主体とで、維持管理に関するノウハウが共有されておらず、適切な方針を構築するのが難しい、という現状である。一般的に、高速道路上に広範囲にわたって点在する個々の設備に対する点検・補修といった直接的な維持管理業務は、それぞれの地域に配置された高速道路事務所で行われる。一方で、各高速道路事務所に対する維持管理のための予算配分や人員配置、そして個々の設備に対する基本的な維持管理施策（故障前に補修するか否か、及び故障時に即時的な補修を行うか否か。本研究では、3. (1)で定義する4種類の維持管理施策を対象とする）は、高速道路事務所を統括する支社や本社（本研究の事例では、西日本高速道路エンジニアリング関西株式会社本社や西日本高速道路株式会社関西支社に相当）で一元的に管理される。そのため、設備の維持管理に直接携わっている高速道路事務所（あるいは現場技術者）が熟知している各設備の特性を支社や本社が共有しつつ、支社や本社はその特性に整合的な維持管理施策を立案する、というような相互補完的な維持管理体制を構築することが望ましい。しかし、現場技術者の設備に関する知見は経験知に留まっており、他者と共有できるほどに明文化・論理化できていない場合が少なくない。また、設備、機器、装置の多様性も相まって支社や本社が個々の設備の特性を把握し切れているとは言い難い。このために、支社や本社からトップダウン型で立案された維持管理施策が現場での実情と整合していない場合がしばしば見られる。

こうした現状を改善するためには、現場技術者の持つ知見を支社や本社が網羅的に把握した上で、設備ごとに維持管理施策を改善してゆくことが必要となる。その際、設備の種類ごとの詳細な分析（故障履歴の統計分析や数理最適化手法による維持管理施策最適化）により、現場技術者の知見と適合した適切な維持管理施策を導出し、現状の維持管理施策を改善することも考え得る。しかし、設備の種類が膨大であり、そのそれぞれに対して詳細な分析を行うには多大な労力を要することを考えると、詳細な分析により本格的な維持管理施策の改善を検討すべき設備として、現状の維持管理施策に改善可能性がある設備を簡易的に抽出するような手法があることが望ましい。

上記の問題意識のもと、本研究では、維持管理施策の区分を明確に定義した上で、現場技術者へのアンケート調査に基づき膨大な種類の設備それぞれの多様な評価基準における特性を簡易的かつ網羅的に把握する。これにより、膨大な種類の設備それぞれにおける特性が客観的情報として把握でき、適切な維持管理施策の決定のために役立つと考えられる。さらに、現場技術者へのアンケート調査においては、現行の維持管理施策に関する調査も行い、上記の適切な維持管理施策と現行の維持管理施

策を相対比較することにより、現行の維持管理施策の改善効果が見込まれる設備のスクリーニングを行う。

(2) 既往研究

2000年代以降、設備の維持管理に関する既往研究が蓄積されている。単一種類の設備に関する統計的劣化予測手法として、トンネル照明の不点を対象としたハザードモデル¹⁾、トンネル照明灯具の劣化に対する多段階ワイブル劣化ハザードモデル²⁾、点検データのサンプルサイズが限定されている場合のトンネル照明灯具の劣化に対する簡易動的マクロモデル³⁾が提案されている。それらの統計的劣化予測結果に基づき、維持管理施策を最適化するための方法論も提案されている^{4)~6)}。

さらに、単一種類の設備の劣化速度や劣化加速度の異質性を定量化するための方法論も提案されており⁸⁾⁹⁾、異なる種類の設備の故障過程の差異を異質性として定量化した研究¹⁰⁾が存在する。当該研究で提案されたランダム比例ワイブル劣化ハザードモデルを用いて、大規模交通管制システムの動的故障解析が行われている¹¹⁾。その際、設備や機器が故障した際の故障継続時間を影響度（本研究においては、後述の「故障自体の利用者への影響」あるいは「復旧作業の困難性」の一部に相当）と定義し、代替部品の在庫状況やヒアリングに基づき、使用開始からの経過時間に対する単調増加関数として影響度を定量化している。当該研究は、複数種類の設備により構成された交通管制システムの補修施策を、個々の設備の故障過程、影響度を考慮しながら決定するという点で、本研究の趣旨と整合的である。交通管制システムに関しては、その故障リスクとして影響度が卓越するため、影響度のみを用いて維持管理施策の是非を議論できるが、一般的な高速道路管理者が管理する多種多様な設備を考えた場合には、より多様な故障リスクを考慮する必要がある。この点は、複数の設備で構成されるシステムの維持管理施策の最適化を目的とした他の既往研究¹²⁾¹³⁾に対しても同様のことが課題として当てはまる。

本来であれば、設備ごとに故障リスクを定義した上で、これらの既往研究のように、定量的な分析を通じた最適維持管理施策の導出を行うことが望ましい。しかしながら、現実の設備の維持管理に目を向けると、膨大な種類の設備において、それぞれの種類ごと故障リスクが十分に定量化されておらず、個々の現場判断により経験的に維持管理されている設備が存在するのが実情である。また、前述のように設備の種類数が極めて多いことから、全ての設備に定量的な分析を行うのが現実的であるとは言い難い。

このような状況に対して、本研究では、アンケート調査に基づき、設備の種類ごとに簡易的に設備の特性（故障特性や故障時のリスク）を把握することによって適切

表-1 設備・装置・機器の種類数

技術分野	設備区分	設備種類数	装置種類数	機器種類数	
電気・機械分野 (機電)	電力設備	10	199	216	
	照明設備	6	46	83	
	トンネル非常用設備	2	24	54	
	トンネル換気設備	4	44	114	
	情報提供設備	11	112	395	
	IV設備	1	9	33	
	路面排水設備	3	14	44	
	雪氷設備	4	72	154	
	通信分野 (通信)	伝送交換設備	7	58	137
		無線設備	6	41	134
ETC設備		6	129	272	
計量設備		3	27	78	
水質分野 (水質)	上下水設備	2	32	55	
大規模情報システム	情報処理設備	28	1,877	1,171	
その他	その他設備	1	2	4	
	建物用設備	6	31	118	
	建築 (管理施設)	1	-	-	
	建築 (休憩施設)	1	-	-	
建築分野	建築 (宿舎等)	1	-	-	
	合計	103	2,717	3,062	

な維持管理施策別に設備を分類し、現状の維持管理施策とのギャップ分析により、維持管理施策の改善可能性がある設備を抽出するための方法論を提案する。一般的に、設備のアセットマネジメントにおいて設備の種類に応じた維持管理の重点化や分類の必要性は認識されている¹⁴⁾。しかしながら、そのための具体的な方法論として、本研究で提案するような、現場技術者の経験的知見を定量化し、設備の維持管理に利用することを試みた研究は、著者等の知る限り過去には存在しない。

(3) 本論文の構成

本論文は以下のように構成される。2.では、設備の概要、及び本研究で分析対象とする設備を説明する。3.では、維持管理施策の分類を明確化し、それぞれの維持管理施策の特性を説明するとともに、現状の維持管理施策に関する課題を述べる。4.では、それぞれの設備の適切な維持管理施策別の分類フローを説明するとともに、現場技術者へのアンケート調査内容を示す。5.では、アンケート調査結果を、故障時の利用者への影響、故障の予兆の有無の観点から整理し、個々の設備を適切な維持管理施策へと分類する。6.では、適切な維持管理施策と現状の維持管理施策の乖離を調べ、現状の維持管理施策の改善可能性がある設備を選定するとともに、具体的な設備に対して維持管理施策の改善に関する示唆を行う。7.では、本研究の結論と今後の課題を述べる。

2. 高速道路設備

(1) 高速道路設備の概要

2021年5月現在、西日本高速道路株式会社関西支社（以下、NEXCO 関西支社）管内の高速道路上で運用されている設備の種類を表-1に示す。全ての設備は、6種類の技術分野のいずれかに区分される。個々の技術分野には、設備区分が存在し、個々の設備区分内に異なる設備が存在する。例えば、「技術分野：電気・機械分野」の「設備区分：電力設備」には、受配電設備、自家発電設備といった異なる種類の設備が計10種類含まれている。また、個々の設備は複数の装置・機器から構成されている。例えば、上記の受配電設備は、輝度計、発電機といった装置あるいは機器により構成されている。表-1の「装置種類数」には、個々の設備区分における機器の種類数を示しており、例えば、「設備区分：電力設備」の10種類の設備には、合計199種類の装置が含まれることになる。なお、通常、単一の装置は、複数の機器で構成されているが、機器を含まない装置も存在している。

「設備区分：情報処理設備」において、装置種類数が機器種類数を上回っているのはこのためである。表-1の最下段に示すように、管理対象である設備は103種類存在し、それらの設備に合計2,717種類の装置及び3,062種類の機器が含まれており、これら多様な設備・装置・機器のそれぞれの種類に対して維持管理施策を設定するのは容易でないことが分かる。なお、以降では、装置、あるいは機器を一括して「装置機器」と呼ぶこととし、こ

これらの適切な維持管理施策を考察する。ただし、1.や各章のタイトルでは「設備を分類する」といった表現を便宜上用いている。この点については、文脈などから意味を適宜判断されたい。

装置機器は、NEXCO 関西支社管内に約 100 万個設置されており、種類数に加えて設置数も膨大である。これらの装置機器における NEXCO 関西支社管内での故障件数および故障に起因した設備の機能停止時間を図-1 に年度ごとに示す。同図からは、NEXCO 関西支社管内で 1 年あたり約 2,000~3,000 件程度の故障が発生しており、近年では故障件数が若干増加していることが見て取れる。また、設備の機能停止時間は、2020 年度には低下傾向が確認できるが、依然として、1 年あたり計 50,000 時間程度の機能停止時間が生じている。

このように、設備を維持管理するにあたっては、管理対象となる設備数が膨大であり、故障によって多くの機能停止時間が生じていることがわかる。そのため、個々の装置機器の故障特性や故障時の利用者への影響に応じて維持管理施策を柔軟に設定し、故障の発生を未然に防ぐ、あるいは、機能停止による利用者の影響を低減するような維持管理体制を構築することの重要性は高い。なお、図-1 に示す情報は、参考文献¹⁵⁾と同様の方法により NEXCO 関西支社管内のデータのみを用いて算出している。設備の現状などに関しては、当該参考文献も併せて参照されたい。

(2) 本研究の分析対象設備

本研究では、調査人員や分析期間の都合上、設備の利用者への影響や故障発生頻度などを勘案し、表-2 に示す 41 種類の装置機器を分析対象として選定した。選定理由について、技術分野ごとに以下で概説する。

a) 電気・機械分野（以下、「機電」と呼ぶ）

機電には、全ての設備の稼働のために必要となる受配電設備、停電時に設備稼働を継続するための自家発電設備（表-2 の 1~14）が含まれており、これらの設備は重要性が高いとして分析対象として選定した。また、機電には、トンネル内設備、情報板、雪氷設備（表-2 の 15~20）も含まれており、これらの設備も利用者の安全性や快適性への影響が大きいことから分析対象として選定した。なお、機電には情報処理設備も含まれているが、管理部署が限られており、維持管理にあたってはソフトウェア資産管理に関する知見が別途必要となることから、本研究の分析対象からは除外した。その結果、機電において、20 種類の装置を分析対象として選定した。

b) 水質分野（以下、「水質」と呼ぶ）

水質には、サービスエリア・パーキングエリアの上水設備・汚水処理設備の 2 種類の設備のみが含まれる。これらの設備は、利用者の快適性に直結するため、2 種類

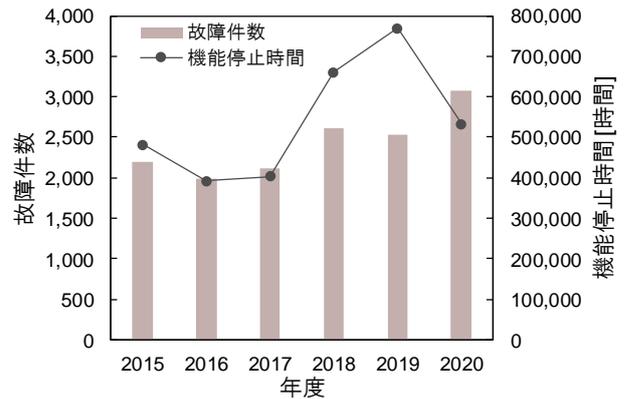


図-1 装置機器の故障件数と機能停止時間

の設備それぞれから主要な装置機器を選定した。その結果、水質において、4 種類の装置機器を分析対象として選定した。

c) 通信分野（以下、「通信」と呼ぶ）

通信には、料金所に設置されている ETC 設備をはじめ、通信ネットワークに関連する設備が含まれる。これらの設備の中でも、利用者の走行の快適性・安全性に大きく関わり、機能停止が利用者の時間損失に直結する ETC 設備を分析対象の設備とし、その中の主要な装置機器を選定した。その結果、通信において、17 種類の装置機器を分析対象として選定した。

d) 大規模情報システム（分析対象外）

大規模情報システムには、主に交通管制情報システムに関する設備が含まれる。これらの設備は、機電の情報処理設備と同様の性質を持っているため、本研究の分析対象からは除外した。なお、大規模情報システムについては、既往研究¹⁶⁾にて、最適維持管理モデルが提案されている。

e) 建築分野（分析対象外）

建築分野には、お手洗い設備や休憩施設の建屋設備が含まれる。当該分野では、建築物の設備が対象となり、上記の他の設備とは、維持管理の特性が異なる（土木構造物への維持管理のような側面も併せ持つ）ため、本研究では分析対象外とした。

3. 維持管理施策の定義・課題・解決方針

(1) 維持管理施策の定義と特性

個々の種類の装置機器に対して考え得る維持管理施策を図-2 のように整理する。維持管理施策は、「予防保全」と「事後保全」に大別され、それらそれぞれに 2 種類の維持管理施策が存在する。以下で、個々の維持管理施策の概要を説明する。

表-2 分析対象の装置機器

番号	分類	設備区分	装置機器
1	機電	受配電設備	輝度計
2	機電	受配電設備	PT (受電用)
3	機電	受配電設備	保護継電器 (静止型)
4	機電	自家発電設備	発電機
5	機電	自家発電設備	保護継電器
6	機電	自家発電設備	AVR
7	機電	自家発電設備	燃料フィルター
8	機電	直流・無停電電源設備	蓄電池_鉛蓄電池 (MSE)
9	機電	直流・無停電電源設備	蓄電池_鉛蓄電池 (MSE以外)
10	機電	直流・無停電電源設備	蓄電池_アルカリ蓄電池
11	機電	直流・無停電電源設備	インバータ盤
12	機電	非常用設備 (避難連絡坑扉)	リミットスイッチ
13	機電	非常用設備 (防災受信盤)	UPS
14	機電	CCTV 設備 (トンネル非常用)	CCTV カメラ_本体
15	機電	トンネル換気設備	UPS
16	機電	可変式道路情報板設備	電源ユニット
17	機電	トンネル照明設備	避難誘導設備_誘導表示板 (バッテリー)
18	機電	雪氷設備	水中ポンプ_本体
19	機電	雪氷設備	サイクロンポンプ_本体 (ケーシング)
20	機電	雪氷設備	薬液ポンプ_本体 (ケーシング)
21	水質	上水設備	給水ポンプ
22	水質	上水設備	ボールタップ
23	水質	汚水処理設備	電磁接触器
24	水質	汚水処理設備	汚水ポンプ
25	通信	ETC 設備	無停電電源装置_蓄電池
26	通信	ETC 設備	車両検知器_軸数センサ (ラインセンサ)
27	通信	ETC 設備	車両検知器_軸数センサ (踏板)
28	通信	ETC 設備	車両検知器_光センサ (レーン幅 3.0m)
29	通信	ETC 設備	車両検知器_光センサ (レーン幅 3.5m)
30	通信	ETC 設備	車線監視制御装置_ハードディスク (サーバ)
31	通信	ETC 設備	車線監視制御装置_液晶モニタ
32	通信	ETC 設備	車線監視制御装置_PC
33	通信	ETC 設備	車線監視制御装置_電源部
34	通信	ETC 設備	車線監視制御装置_収容架エアフィルタ
35	通信	ETC 設備	発進制御機_駆動部 (サーボモータ)
36	通信	ETC 設備	料金所サーバ_ハードディスク (タイプ 4)
37	通信	ETC 設備	料金所サーバ_SAM 基板 (タイプ 5)
38	通信	ETC 設備	車線サーバ_SAM 基板
39	通信	ETC 設備	車線サーバ_電源部
40	通信	ETC 設備	車線サーバ_CPU バッテリー
41	通信	ETC 設備	双方向インターホン (親機)_ハードディスク

a) 予防保全

予防保全では、装置機器の故障発生前に対処を行う。予防保全は、以下の「予知保全」と「定期交換」の 2 種類に区別される。

予知保全

装置機器が故障する予兆を観測・検知した場合に補修を行う施策である。故障予兆の観測方法として、点検時の電流・接地抵抗等の計測、センサーによる常時モニタリングなどがあげられる。ただし、設置からの経過年数のみに基づく場合は、以下の定期交換に該当すると考える。

定期交換

装置機器を設置してから経過した年数により、定



図-2 維持管理施策の区分

期的に補修を行う施策である。経年に対して摩耗的故障が生じる装置機器に対して、定期交換年数が定められる。定期交換年数は、メーカー推奨年数、もしくは故障履歴データを用いた統計分析結果により設定される。なお、定期交換を、経過年数を予兆と

表-3 維持管理施策の特性

	突発故障の 頻度	突発故障の 対応時間	突発故障時 の人的負荷	実施費用
予知保全	少ない	短い	少ない	少ない
定期交換	少ない	短い	少ない	多い
故障時 即時補修	多い	短い	多い	少ない
故障時 順次補修	多い	長い	少ない	少ない

した予知保全と捉えることもできる。しかし、上述の常時モニタリングと経過年数をそれぞれ予兆として活用した場合には、故障を事前に検出できる精度が異なると予想され、また、高速道路設備の維持管理施策を議論するにあたり予知保全と定期交換は慣例的に区別されている。これらを鑑みて、本研究でも予知保全と定期交換を区別して議論を進める。

b) 事後保全

事後保全では、装置機器の故障発生前に対処は行わず、故障発生後のみに対処を行う。事後保全は、以下の「故障時即時補修」と「故障時順次補修」の2種類に区別される。

故障時即時補修

装置機器の故障が発生した場合に、機能回復のための補修を早急を実施する維持管理施策である。補修に即時性が求められるため、計画的に実施された補修と比較し、補修時の人員や費用は増加する。

故障時順次補修

装置機器の故障が発生した場合、対処するまでの猶予があり、タイミングを見計らって対処を行う維持管理施策である。

c) それぞれの維持管理施策の特性

上記の4種類の維持管理施策の特性を表-3に取りまとめる。事後保全と比べ、予防保全では装置機器の故障前に予防的な処置として補修を行うため、突発的な故障の発生頻度は少なくなる。故障時順次補修以外の維持管理施策では、突発的な故障が発生した際に、即時補修を行うため対応時間が短くなる。その際、故障時即時補修では、突発的な故障発生頻度が高いため、故障後に早急に対処を行うものの、機能停止時間は予防保全に比べ多くなる。また、故障時即時補修では、突発的な故障に対応するための人的負荷が増加する。定期交換では、多くの装置機器に対して故障発生前に補修を行うため実施費用が増加する一方で、予知保全ではモニタリングで獲得した情報に基づき限られた装置機器に対してのみ故障発生前に補修を実施するため実施費用が抑えられる。

なお、設備の状態を新設時と同等な状態に戻すような

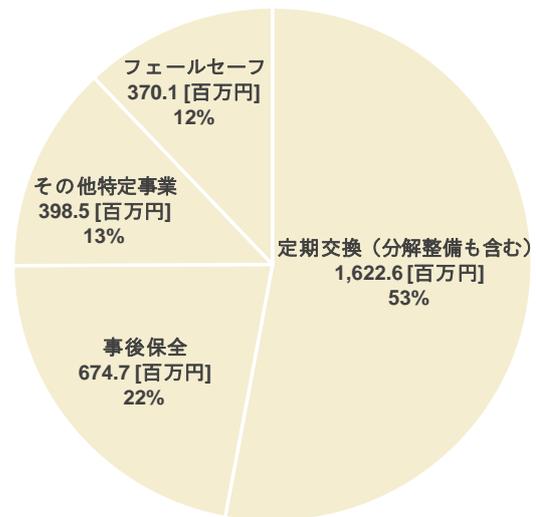


図-3 保全工事費 (3,065.9 百万円) の内訳 (NEXCO エンジニアリング関西 2019 年度計画)

行為は、装置機器の種類などに応じて保全、取替、調整、交換、復旧、更新などと呼ばれるが、本稿では、統一的に「補修」と呼ぶこととする。ただし、「予知保全」、「事後保全」、「定期交換」については、これらの用語が慣例的に用いられていることから、ここでもそれを踏襲する。また、装置機器の突発的な故障に対する対応に限っては「復旧」という用語を使用する。

(2) 現状の維持管理施策に関する課題と解決方針

a) 現状の維持管理施策自体に関する課題

ここで、NEXCO 関西支社管内の装置機器に対する維持管理施策の現状を、保全工事費の観点から整理しよう。図-3に、2019年度の西日本高速道路エンジニアリング関西株式会社の維持管理計画における、点検を除いた維持管理費用 (保全工事費) の内訳を示す。この図を見ると、まず、維持管理費用の50%程度が定期交換費用として計画されていることが分かる。定期交換は、法令により定期交換が義務付けられている装置機器 (例えば、気象観測用の計量器) や、西日本高速道路株式会社が重要設備として位置付ける電力設備やトンネル非常用設備に対して実施されている。なお、2020年度では、NEXCO 関西支社管内において維持管理施策が定期交換とされている装置機器は、56種類 (全体の8%程度) である。定期交換では、経過時間のみから補修時期を判断し、故障前の装置機器も一括して補修することから、生じる費用も大きくなる。

また、NEXCO 関西支社管内では、定期交換が実施されていない装置機器のほとんどに対して、事後保全による維持管理が実施されている。このため、事後保全実施のための費用も2番目に多く計上されている。なお、予

知保全も一部の装置機器で実施されているが、その件数は非常に少なく、実施費用も事後保全として計上されているのが現状である。定期交換により故障が未然に防がれると考えると、図-1 に示した故障の発生や設備の機能停止に関しては、事後保全が実施されている装置機器によるものが大部分を占めると考えられる。

上記の事柄から、現状の維持管理施策として、事後保全と定期交換が主流となっていることが見て取れる。これを踏まえ、今後の維持管理施策の改善のための実務的課題として以下の2点が考え得る。

- 定期交換では多くの費用が必要となるため、予知保全の導入を検討し、故障および機能停止を防ぎつつも費用の低減を図ること（予知保全と定期交換を併用し、定期交換頻度を減少させ費用低減を図ることも含む）
- 事後保全では故障に起因した利用者への影響が生じるため、定期交換あるいは予知保全の導入を検討し、利用者への影響や突発的な補修に起因した補修費用の増加を抑制すること

これらの課題を解決するためには、管理するそれぞれの装置機器に対して、特性に応じた維持管理施策を採用する必要がある。そのための方法として、故障履歴データの統計分析により故障特性を解明し、ライフサイクル費用最小化あるいは社会的総余剰最大化の観点に基づく数理最適化モデル^{5,6,7)}により最適な維持管理施策を設備の種類ごとに決定することが考え得る。しかしながら、このような詳細な分析を膨大な種類の装置機器それぞれに行うには多大な労力が必要となる。また、台帳データと故障履歴データの記録単位の相違や、十分な故障履歴が蓄積されていないなどにより、全ての種類の装置機器で詳細な分析が可能であるとは限らない。そのため、維持管理施策の改善効果が多く見込める装置機器を簡易的にスクリーニングし、それらの装置機器から順次詳細な分析による維持管理施策改善の検討（そのためのデータ整備の検討なども含む）を行うことが現実的である。

b) 現状の維持管理施策の把握状況に関する課題

NEXCO 関西支社管内では、支社や本社からのトップダウン型で維持管理施策が施策的に指定される。しかし、個々の高速道路事務所や事業所に実際の維持管理施策の選定の権限が付与されている場合も少なくない。そのため、同一種類の装置機器でも実際の維持管理施策が高速道路事務所ごとに異なる場合がある。さらに、それが明文化されていないために、現状の維持管理施策が支社や本社で完全には把握されていない状況（暗黙的に把握されているが、明確な根拠に基づき文書化された情報ではない状況も含む）も存在する。

c) 解決方針

3.(2)a)の課題を解決するために、本研究では、現場技

術者へのアンケート調査に基づき、装置機器の種類ごとに特性を把握する。アンケート調査で獲得した設備の特性に関する情報に基づき、膨大な種類の装置機器それぞれに適切な維持管理施策を割り当てる（それぞれの装置機器の種類を適切な維持管理施策別に分類する）ことができる。さらに、3.(2)b)の課題を解決するために、本研究では、現状の維持管理施策についてもアンケート調査にて併せて情報を収集することとする。適切な維持管理施策と現状の維持管理施策とが異なる装置機器が、維持管理施策に改善可能性がある装置機器としてスクリーニングされる。このようにアンケート調査に基づく方法論は、点検データの詳細な統計分析や数理最適化モデルに基づく分析で必要となるような専門知識や計算機器を必要としないため、簡易的なスクリーニング手法に相当すると考えられる。

なお、本研究での提案方法論における、現場技術者へのアンケート調査に基づき膨大な種類の設備への簡易的なスクリーニングを行う、という考え方は、現状の維持管理施策に関わらず、汎用的に有用であると考えられる。例えば、仮に現状の維持管理施策で定期交換が多く採用されていたとしても、予知保全への改善可能性を提案方法論により検証することができる。また、本研究で行ったスクリーニング結果に基づき維持管理施策を改善した後にも、マネジメントレビューのために提案方法論による分析を数年間隔で繰り返し実施する、といったことも考えられる。本研究は、このような汎用的な方法論を提案するという立場を取った上で、NEXCO 関西支社管内の設備を具体例として取り上げ、3.(2)a), b)で述べた実務的課題を解決するために提案方法論を用いる。

4. 設備分類フローとアンケート調査内容

(1) 適切な維持管理施策の定義

装置機器ごとの適切な維持管理施策を議論する場合、「故障自体の利用者への影響」、「復旧作業の困難性」、「故障の頻度」、「故障特性（故障発生の時間依存性、故障の予兆検出可能性）」、「故障時の補修費用」、「予算制約・人材資源制約」、「設備の設置個数」などの多面的な要素を考慮する必要がある。ここでは、まず、予知保全を最も高度な維持管理施策として、定期交換、故障時即時補修、故障時順次補修の順に高度さが低減すると定義する。その上で、表-4 に示すように、主要な要素を高度な維持管理施策の必要性を表す要素と改善の可能性を表す要素に大別する。例えば、「故障自体の利用者への影響」が大きい、また「経過時間以外の故障の予兆検出可能性」が高い程、高度な維持管理施策がそれぞれ必要、可能であることを意味する。なお、ここでは便

表-4 維持管理施策決定のための要素

要素	必要性/可能性	考え得る情報源の例
故障自体の利用者への影響 ^{**}	必要性	個々の設備の設置状況ごとの交通流分析
復旧作業の困難性 ^{**}	必要性	補修用部品の備蓄状況を考慮したシミュレーション分析
故障頻度	必要性	故障履歴データを用いた簡易的な統計分析
故障の時間依存性 ^{**}	可能性	台帳データと故障履歴データを用いた統計分析
経過時間以外の故障の予兆検出可能性 ^{**}	可能性	モニタリングの試行, 事後評価
設置個数	双方	台帳データ
補修費用	双方	積算基準
予算・人員制約	双方	予算配分・人員配置に関する資料

※：本研究でのアンケート調査対象

宜的に「高度な」という用語を用いているが、それが維持管理施策の優劣関係と必ずしも対応している訳ではないことに留意されたい。例えば、故障による利用者影響が極めて小さい装置機器の故障に対して即時的な対処を求める必要が無いように、全ての設備に対して高度な維持管理施策が求められている訳ではない。

上記の考え方のもと、ある種類の装置機器において、必要性・採用可能性の双方が高い維持管理施策の中で最も高度な維持管理施策を当該装置機器の「適切な維持管理施策」と呼ぶこととする。なお、本研究での選定基準は、現在の装置機器の特性、維持管理体制を基準としている。高度な維持管理施策の必要性は高いが採用可能性は低い装置機器に対しては、故障時の利用者への影響の低減や新たな故障の予兆検出に向けた抜本的な取り組み（例えば、装置機器自体の性能の向上）が必要となることは論を俟たない。

(2) アンケート調査で獲得すべき情報

表-4に示す要素のうち、「設置個数」や「故障頻度」については、台帳データや故障履歴データを蓄積することにより、一元的に把握できる可能性がある。また、「補修費用」、「予算・人員制約」は、高速道路ネットワーク上に点在する個々の装置機器から情報を得ずとも維持管理施策決定・改善の検討のための条件を比較的把握し易いと考えられる。一方で、「故障自体の利用者への影響」については、既往研究⁷⁾のような交通流分析による利用者便益を考慮した詳細な分析が必要となり、「復旧作業の困難性」については、故障時の復旧作業の具体的な工程に関する現状を調査する必要がある。また、「故障の時間依存性」は、装置機器の設置状況に依存し、設置当初には想定し得なかった故障特性が実用状況下の装置機器では生じている可能性があるため、故障履歴の統計分析を行い、装置機器の特性を把握することが望ま

表-5 装置機器の特性ごとの適切な維持管理施策

装置機器の特性	適切な維持管理施策
常時モニタリングや日常の維持管理行為において、故障の予兆が検出でき、故障による利用者への影響が大きい装置機器	予知保全
時間の経過とともに故障確率が増加してゆき（摩耗的な故障特性を持ち）、故障による利用者への影響が大きい装置機器	定期交換
時間の経過によらず一定の確率で故障が発生し（偶発的な故障特性を持ち）、故障による利用者への影響が大きい装置機器	故障時即時補修
故障による利用者への影響がほとんどない装置機器	故障時順次補修

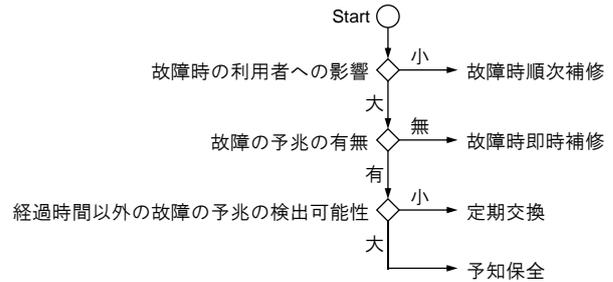


図-4 適切な維持管理施策への分類フロー

しい。さらには、「経過時間以外の故障の予兆検出可能性」については、日常的に装置機器の維持管理を行っている現場技術者ならではの知見が存在する可能性がある。

本研究では、詳細な分析のために労力が必要であることと、供用状況下の装置機器から情報を得る必要があることを条件として、「故障自体の利用者への影響」、「復旧作業の困難性」、「故障の時間依存性」、「経過時間以外の故障の予兆検出可能性」の4種類の要素をアンケート調査の対象とし、それらの要素に基づき装置機器の種類ごとに適切な維持管理施策を決定することとした。

(3) 分類フロー

4.(2)で述べた装置機器の特性を表す4種類の要素のうち、「故障自体の利用者への影響」と「復旧作業の困難性」を高度な維持管理施策の必要性を表す「故障時の利用者への影響」に関する特性、「故障の時間依存性」と「経過時間以外の故障の予兆検出可能性」を高度な維持管理施策の採用可能性を表す「故障特性」に関する特性と位置付ける。「故障時の利用者への影響」が高い装置機器は高度な維持管理施策の必要性が高いとし、それらの装置機器に対しては、故障時順次補修以外の維持管理施策が必要となると考える。また、「故障特性」に関して、「故障の時間依存性」が高い装置機器には定期交換が可能となり、「経過時間以外の故障の予兆検出可能性」が高い装置機器には予知保全が可能となる。これらの点は、表-5のように整理できる。

表-5の選定基準に基づき、適切な維持管理施策別の装

表-6 アンケート調査内容

項目	設問
1-1) 故障自体の利用者への影響	【設問 1】 故障時の安全性への影響はあるか。 選択肢 1: ある 選択肢 2: 条件による 選択肢 3: ない
	【設問 2】 故障時の旅行時間への影響はあるか。 選択肢 1: ある 選択肢 2: 条件による 選択肢 3: ない
	【設問 3】 故障時の快適性への影響はあるか。 選択肢 1: ある 選択肢 2: 条件による 選択肢 3: ない
1-2) 復旧作業の困難性	【設問 1】 故障時の復旧にかかる時間はどの程度か。 選択肢 1: 大きい 選択肢 2: 条件による 選択肢 3: ない
	【設問 2】 故障時の復旧作業の危険性はどの程度か。 選択肢 1: 大きい 選択肢 2: 条件による 選択肢 3: ない
	【設問 3】 故障時の復旧作業の難易度はどの程度か。 選択肢 1: 大きい 選択肢 2: 条件による 選択肢 3: ない
	【設問 4】 故障時の復旧作業の作業規模はどの程度か。 選択肢 1: 大きい 選択肢 2: 条件による 選択肢 3: ない
2) 故障の予兆	【設問 1】 故障の予兆・特性に関して当てはまるのはどれか (複数回答可)。 選択肢 1: 突然壊れる 選択肢 2: 経過年数による 選択肢 3: 使用回数・動作時間による 選択肢 4: 絶縁抵抗などの測定結果による 選択肢 5: 上記以外に特徴的な前兆がある (例えば、湿度上昇など)
3) 現状の維持管理施策	【設問 1】 現状の維持管理施策はどれに当てはまるか。 選択肢 1: 故障時順次補修 選択肢 2: 故障時即時補修 選択肢 3: 定期交換 選択肢 4: 予知保全

※設問内容に対する回答者の誤解を防ぐため、実際のアンケート用紙では、より詳細な説明を加えている設問もある。

置機器の分類フローを図-4のように整理する。提案する分類フローでは、まず、故障時の利用者への影響が小さい装置機器 (高度な維持管理施策の必要性が低い装置機器) を、故障時順次補修に分類する。次に、故障時の利用者への影響が大きい装置機器に関して、故障の予兆が検出できない装置機器を、予防保全の採用可能性が低い装置機器として故障時即時補修に分類する。ここまでのプロセスで、事後保全のみが可能である (あるいは、事後保全を採用せざるを得ない) 装置機器が選定され、残りの装置機器は、予防保全の採用可能性がある装置機器となる。それら残りの装置機器に関して、経過時間のみで故障の予兆が現れる装置機器を、定期交換に分類する。一方で、経過時間以外で故障の予兆が検出できる装置機器については、予知保全に分類する。

なお、提案する分類フローは、装置機器の個々の特性の大小に応じた適切な維持管理施策の傾向を概念的に示している。本研究では、装置機器を適切な維持管理施策へ明確に分類するために、5.(3)で後述するように、アンケート調査結果に閾値を設定し、提案する分類フローに従い装置機器の分類を行う。ただし、閾値を設定せずとも個々の設備の特性自体は把握できる点には留意されたい。また、閾値は予算やアセットマネジメントの計画などに応じて柔軟に変更できる。例えば、現状の維持管理施策との乖離度合いを参照しながら閾値を決定する、

閾値をアセットマネジメントの目標として設定し維持管理施策の高度化度合いに関する成熟度指標として用いる、といったことも考え得る。しかし、本研究では、議論の煩雑化を防ぐため、閾値の設定方法についての詳細は議論の対象外とする。

(4) アンケート調査の設問内容・実施方法

4.(3)で述べた考え方に従い、個々の装置機器を種類ごとに適切な維持管理施策に分類するために、表-6に示す項目・内容に関してアンケート調査を実施した。装置機器の種類ごとに、同表の個々の設問に関する回答を獲得した。まず、図-4の分類フローの「故障時の利用者への影響」を項目「1-1) 故障自体の利用者への影響」及び「1-2) 復旧作業の困難性」に分割し、それぞれ3種類と4種類の設問によって調査した。図-4の分類フローの「故障の予兆の有無」と「経過時間以外の故障の予兆の検出可能性」については、項目「2) 故障の予兆」により一括して調査した。また、個々の装置機器の特性以外に、現状の維持管理施策に関しても、項目「3) 現状の維持管理施策」により調査を行った。

表-7に、アンケート対象装置機器、アンケート対象者の特性、サンプル数を取りまとめる。対象とする41種類の装置機器を技術分野ごとに区分しアンケート調査を実施した。例えば、機電であれば、10 高速道路事務所

表-7 アンケート調査対象・実施方法

対象装置機器	表-2 に示した 41 種類 (機電: 20 種類, 水質: 4 種類, 通信: 17 種類)
対象者	5 年以上の維持管理業務の経験を持つ現場技術者
サンプル数	機電: 10 高速道路事務所 45 名 水質: 6 高速道路事務所 15 名 通信: 28 高速道路事務所 147 名

の計 45 名の現場技術者それぞれから、対象とする 20 種類の装置機器それぞれに対する個々の設問の回答を獲得した。なお、アンケート調査において、NEXCO 関西支社管内の高速道路事務所を対象とした。また、アンケート調査対象者は、当該技術分野において 5 年以上の維持管理業務の経験を持つ NEXCO エンジニアリング関西または西日本高速道路ファシリティーズ株式会社所属の現場技術者とした。

5. アンケート調査結果と設備の分類

(1) 故障時の利用者への影響

まず、故障自体の利用者の影響と復旧作業の困難性の 2 種類の評価項目により、個々の装置機器における故障時の利用者への影響を把握する。表-6 に示したように、アンケート調査において、故障自体の利用者への影響は 3 種類の設問、復旧作業の困難性は 4 種類の設問に対する回答を得ている。ここでは、個々の設問において「選択肢 1」が選択された割合を指標とし、それぞれの項目において、最も大きい値をそれぞれ「故障自体の利用者への影響 (最大値)」, 「復旧作業の困難性 (最大値)」と呼ぶこととする。

図-5 に、上記 2 種類の値の調査結果を、装置機器ごとに示す。同図から、故障自体の利用者への影響、復旧作業の困難性は、装置機器ごとに多様にばらついていることが確認できる。また、機電に分類される装置機器に関しては復旧作業の困難性が、通信に分類される装置機器に関しては故障自体の利用者への影響が、それぞれ相対的に大きいことが見て取れる。機電、通信と比較して、水質に分類される装置機器に関しては、故障自体の利用者への影響、復旧作業の困難性の双方が相対的に低い傾向が確認できる。

(2) 故障の予兆

次に、故障の時間依存性と経過年数以外の故障の予兆の有無の 2 種類の評価項目により、個々の装置機器における故障の予兆の有無を把握する。表-6 に示したように、アンケート調査の項目 2) の設問 1 において、故障の時間依存性に関しては、偶発的な故障が卓越する (選択肢

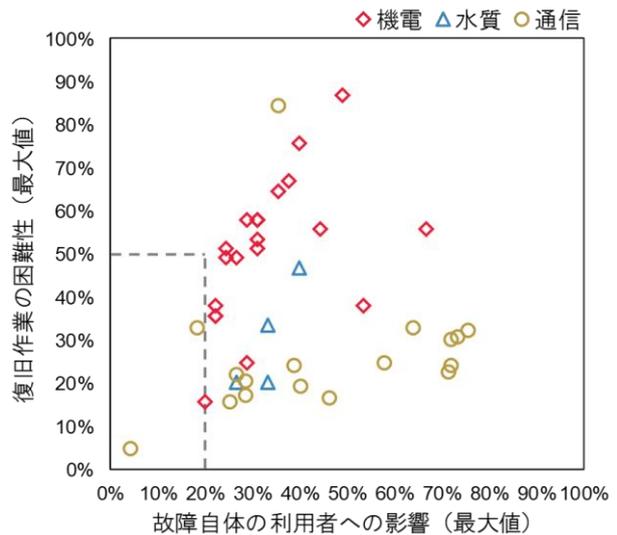


図-5 故障時の利用者への影響の調査結果

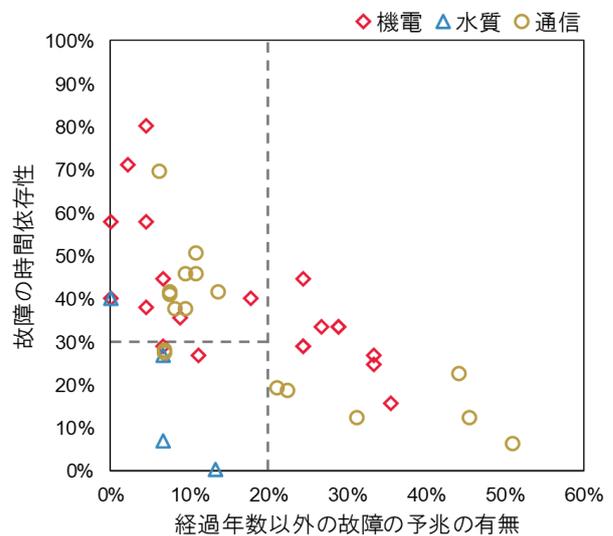


図-6 故障の予兆の有無の調査結果

1: 突然壊れる) か、経年による摩耗的な故障が卓越する (選択肢 2: 経過年数による) かを調査している。また、経過年数以外の予兆については、測定結果、使用回数・動作時間、それ以外の予兆の 3 種類の設問により調査を行っている。なお、アンケート調査の項目 2) の設問 1 は複数回答を許容している点には留意されたい。ここでは、当該設問において、「選択肢 2」が選択された割合を「故障の時間依存性」、経過年数以外の予兆に関しては、「選択肢 3」, 「選択肢 4」, 「選択肢 5」の中で最も選択された割合が高いものを「経過年数以外の故障の予兆の有無」として個々の装置機器の特性を整理する。

図-6 に、上記 2 種類の値の調査結果を、装置機器ごとに示す。同図から、故障の時間依存性と経過年数以外の予兆の双方の指標が高い値を持つ装置機器は存在しない

表-8 装置機器に対する適切な維持管理施策ごとの分類結果

番号	設備区分	装置機器	適切な維持管理施策	現状の維持管理施策
1	受配電設備	輝度計	定期交換	故障時即時補修
2	受配電設備	PT (受電用)	故障時即時補修	故障時即時補修
3	受配電設備	保護継電器 (静止型)	予知保全	故障時即時補修
4	自家発電設備	発電機	定期交換	故障時即時補修
5	自家発電設備	保護継電器	予知保全	故障時即時補修
6	自家発電設備	AVR	定期交換	故障時即時補修
7	自家発電設備	燃料フィルター	予知保全	定期交換
8	直流・無停電電源設備	蓄電池_鉛蓄電池 (MSE)	予知保全	予知保全
9	直流・無停電電源設備	蓄電池_鉛蓄電池 (MSE 以外)	予知保全	予知保全
10	直流・無停電電源設備	蓄電池_アルカリ蓄電池	予知保全	予知保全
11	直流・無停電電源設備	インバータ盤	定期交換	故障時即時補修
12	非常用設備 (避難連絡坑扉)	リミットスイッチ	故障時順次補修	故障時即時補修
13	非常用設備 (防災受信盤)	UPS	定期交換	定期交換
14	CCTV 設備 (トンネル非常用)	CCTV カメラ_本体	定期交換	故障時即時補修
15	トンネル換気設備	UPS	定期交換	定期交換
16	可変式道路情報板設備	電源ユニット	定期交換	故障時即時補修
17	トンネル照明設備	避難誘導設備_誘導表示板 (バッテリー)	定期交換	故障時順次補修
18	雪氷設備	水中ポンプ_本体	予知保全	予知保全
19	雪氷設備	サイクロンポンプ_本体 (ケーシング)	予知保全	予知保全
20	雪氷設備	薬液ポンプ_本体 (ケーシング)	予知保全	予知保全
21	上水設備	給水ポンプ	故障時即時補修	故障時即時補修
22	上水設備	ボールタップ	定期交換	定期交換
23	汚水処理設備	電磁接触器	故障時即時補修	故障時即時補修
24	汚水処理設備	汚水ポンプ	故障時即時補修	定期交換
25	ETC 設備	無停電電源装置_蓄電池	予知保全	故障時即時補修
26	ETC 設備	車両検知器_軸数センサ (ラインセンサ)	予知保全	故障時即時補修
27	ETC 設備	車両検知器_軸数センサ (踏板)	予知保全	故障時即時補修
28	ETC 設備	車両検知器_光センサ (レーン幅 3.0m)	予知保全	故障時即時補修
29	ETC 設備	車両検知器_光センサ (レーン幅 3.5m)	予知保全	故障時即時補修
30	ETC 設備	車線監視制御装置_ハードディスク (サーバ)	定期交換	故障時即時補修
31	ETC 設備	車線監視制御装置_液晶モニタ	定期交換	故障時即時補修
32	ETC 設備	車線監視制御装置_PC	定期交換	故障時即時補修
33	ETC 設備	車線監視制御装置_電源部	定期交換	故障時即時補修
34	ETC 設備	車線監視制御装置_取容架エアフィルタ	故障時順次補修	故障時順次補修
35	ETC 設備	発進制御機_駆動部 (サーボモータ)	予知保全	故障時即時補修
36	ETC 設備	料金所サーバ_ハードディスク (タイプ 4)	故障時順次補修	故障時即時補修
37	ETC 設備	料金所サーバ_SAM 基板 (タイプ 5)	故障時即時補修	故障時即時補修
38	ETC 設備	車線サーバ_SAM 基板	故障時即時補修	故障時即時補修
39	ETC 設備	車線サーバ_電源部	定期交換	故障時即時補修
40	ETC 設備	車線サーバ_CPU バッテリー	定期交換	故障時即時補修
41	ETC 設備	双方向インターホン (親機)_ハードディスク	定期交換	故障時即時補修

ものの、それらのいずれかが高い値となる、あるいは、それら双方が中程度の値となる装置機器が多いことが見て取れる。一方で、中には、それら 2 種類の故障の予兆の指標の値がともに低い装置機器も存在することが併せて確認できる。

(3) 適切な維持管理施策への設備の分類

5.(1), (2) に示したアンケート調査結果に基づき、図-4 のフローに従って装置機器を分類する。まず、故障時の利用者への影響に着目し、維持管理施策として故障時順次補修を採用することが適切な装置機器を選定する。故障時の利用者への影響が小さい装置機器を故障時順次補

修に分類することとし、ここでは、図-5 に灰色破線で示すように、故障自体の利用者への影響 (最大値) が 20% 未満かつ復旧作業の困難性 (最大値) が 50% 未満であることを条件に選定を行った。その結果、3 種類の装置機器を故障時順次補修が適切な装置機器として選定した。

次に、故障時順次補修に分類された装置機器以外の未分類の装置機器に関して、故障の予兆の有無に着目して適切な維持管理施策別の分類を行う。ここでは、図-6 に灰色破線で示すように、故障の時間依存性における 30%、経過年数以外の故障の予兆の有無における 20% をそれぞれ閾値として設定する。その上で、図-4 のフローに従い、故障の時間依存性、経過年数以外の故障の予兆の有無の

表-9 適切な維持管理施策と現状の維持管理施策の組合せごとの装置機器の種類数

		適切な維持管理施策			
		故障時順次補修	故障時即時補修	定期交換	予知保全
現状の 維持管理施策	故障時順次補修	1	0*	1*	0*
	故障時即時補修	2**	5	13*	8*
	定期交換	0**	1**	3	1*
	予知保全	0**	0**	0**	6

双方において閾値を下回る 6 種類の装置機器を、故障の予兆を確認することは困難であるが故障時の利用者への影響が大きい装置機器であると考え、故障時即時補修が適切な装置機器に分類した。それ以外の未分類の装置機器に関して、故障の時間依存性のみが閾値を上回る 17 種類の装置機器を、故障時の利用者への影響が大きいものの故障の発生可能性が高まる前に補修を行うことにより利用者への影響を低減できる可能性がある装置機器であると考え、定期交換が適切な装置機器に分類した。

最後に、残りの 15 種類の装置機器は、経過年数以外の故障の予兆を観測することによる予知保全が導入できる可能性がある装置機器であると考え、予知保全が適切な装置機器に分類した。これらの分類の結果は表-8 のように取りまとめられる。なお、予知保全と定期交換は排他的な関係ではないため、故障の時間依存性、経過年数以外の故障の予兆の有無の双方において回答率が高い装置機器においては、予知保全と定期交換の複合的な維持管理施策が有用となる可能性がある。

6. 維持管理施策の改善可能性と実務的示唆

(1) 現状の維持管理施策の調査結果

3.(2)c)で述べたように、本研究では、個々の装置機器における現状の維持管理施策についても併せてアンケート調査を実施した。具体的には、表-6 の項目 3) の設問 1 において最も選択割合が高かった維持管理施策を現状の維持管理施策とし、その結果を表-8 に併記している。同表に示すように、予知保全を採用している装置機器が 6 種類、定期交換を採用している装置機器が 5 種類、故障時即時補修を採用している装置機器が 28 種類、故障時順次補修を採用している装置機器が 2 種類であった。調査結果から、7 割以上の種類の装置機器が事後保全により維持管理されている現状が見て取れ、特に受配電設備や ETC 設備で事後保全で維持管理がなされている傾向が強いことが確認できる。また、直流・無停電電源設備及び雪氷設備では、予知保全の導入が開始していることも確認できる。定期交換に関して、導入されている装置機器の種類が 1 割程度であるにも関わらず、図-3 で 50%以上の予算が充てられていることから、定期交換に

より多くの維持管理費用が必要となることが確認できる。

(2) 維持管理施策の改善可能性

表-8 に示した結果から、アンケート調査に基づいて導出した適切な維持管理施策と、現状の維持管理施策を対比することにより、維持管理施策を改善すべき装置機器を、現場技術者の知見を反映しながらシステマチックに抽出できる。表-9 に、適切な維持管理施策と現状の維持管理施策の組合せごとに装置機器の種類数を集計した結果を示す。同表において、右肩に記号「*」を付与した種類数の合計値が、現状の維持管理施策に改善可能性がある装置機器の種類数となり、ここでは、合計 23 種類の装置機器の維持管理施策の改善可能性が示唆された。また、右肩に記号を付与していない種類数の合計値が、現状の維持管理施策に妥当性がある装置機器の種類数となり、ここでは、合計 15 種類の装置機器の維持管理施策の妥当性が示唆された。さらに、右肩に記号「**」を付与した種類数の合計値が、現状の維持管理施策が過度に高度である可能性がある装置機器の種類数となり、ここでは、合計 3 種類の装置機器の維持管理施策が過度に高度である可能性が示唆された。このように、アンケート調査により導出された適切な維持管理施策と現状の維持管理施策を比較することにより、維持管理施策の改善可能性、維持管理施策の妥当性、維持管理施策が過度に高度である可能性のある装置機器をそれぞれ抽出することができる。なお、表-8 での適切な維持管理施策の選定結果は、5. で与えた分類基準の閾値に応じて変化することには改めて留意されたい。具体的には、5.(3) で示したそれぞれの閾値の値を大きくすると、維持管理施策に改善可能性があるとして分類される装置機器の種類数は少なくなる。

(3) 維持管理施策の改善可能性に基づく実務的示唆

実務において維持管理施策を実際に改善してゆく場合には、ここで導出した適切な維持管理施策に関する情報に加え、表-4 に示した複数の要素を総合的に勘案する必要がある。ここでは、それらのうち、アンケート調査で獲得した知見に加えて、NEXCO 関西支社管内での「故障頻度」及び「設置個数」を取り上げ、表-8 の結果から

表-10 定期交換への改善可能性のある装置機器のスクリーニング結果

番号	設備区分	装置機器	現状の維持管理 施策	故障の時間 依存性	故障自体の 利用者への 影響 (最大 値)	復旧作業の 困難性 (最大 値)
16	可変式道路情報板設備	電源ユニット	故障時即時補修	57.8%	66.7%	55.6%
17	トンネル照明設備	避難誘導設備_誘導表示板 (バッテリー)	故障時順次補修	57.8%	28.9%	24.4%
40	ETC設備	車線サーバ_CPUバッテリー	故障時即時補修	50.3%	38.8%	23.8%
30	ETC設備	車線監視制御装置_ハードディスク (サーバ)	故障時即時補修	45.6%	28.6%	17.0%
31	ETC設備	車線監視制御装置_液晶モニター	故障時即時補修	45.6%	25.2%	15.6%
11	直流・無停電電源設備	インバータ盤	故障時即時補修	44.4%	37.8%	66.7%
41	ETC設備	双方向インターホン (親機) _ハードディスク	故障時即時補修	41.5%	46.3%	16.3%
32	ETC設備	車線監視制御装置_PC	故障時即時補修	40.8%	28.6%	20.4%
4	自家発電設備	発電機	故障時即時補修	40.0%	48.9%	86.7%
14	CCTV設備 (トンネル非常用)	CCTVカメラ_本体	故障時即時補修	40.0%	22.2%	35.6%
1	受配電設備	輝度計	故障時即時補修	37.8%	53.3%	37.8%
33	ETC設備	車線監視制御装置_電源部	故障時即時補修	37.4%	26.5%	21.8%
39	ETC設備	車線サーバ_電源部	故障時即時補修	37.4%	75.5%	32.0%
6	自家発電設備	AVR	故障時即時補修	35.6%	400%	75.6%

維持管理施策の改善可能性が特に見込まれるであろう数種類の設備を例に、実際の維持管理施策の決定方針や詳細な分析手法の候補を例示する。また、例とした設備の特性や現行の維持管理施策も併記し、アンケート調査による情報の妥当性も併せて確認する。これらの点に関して、適切な維持管理施策ごとに以下で考察を行ってゆく。なお、以下で、故障頻度の指標として年平均故障発生回数 (2016年度から2020年度までの過去5年間の故障履歴データを集計) に言及する。各装置機器の故障率の大きさ比較の目安として、故障履歴データが獲得されている装置機器全体で、1つの装置機器あたりの年平均故障発生回数は、0.0172 [回/装置機器/年]であったことをここで述べておく。

a) 定期交換への改善可能性

表-10に、可能性のある維持管理施策が定期交換となった17種類のうち、現状の維持管理施策が定期交換以外の14種類の装置機器を、それぞれの現状の維持管理施策、故障の時間依存性、故障自体の利用者への影響 (最大値)、復旧作業の困難性 (最大値) とともに、故障の時間依存性の降順に示す。ここでは、故障の時間依存性の上位3位の装置機器を具体例として取り上げ、定期交換への改善可能性を以下で考察する。

16. 可変式道路情報板設備 電源ユニット

故障の時間依存性に加えて、故障自体の利用者への影響 (最大値)、復旧作業の困難性 (最大値) の双方も高い値となった装置機器である。また、故障頻度は0.0176 [回/装置機器/年]、設置個数は35,421個であった。故障頻度は平均程度であるものの、表-10の結果及び設置個数を考慮すると、定期交換の必要性・採用可能性ともに高い装置機器であると判断できる。

電源ユニットの故障の多くは、その構成部品の1つであるコンデンサの寿命 (摩耗的故障) に起因している。

そのため、故障履歴データに対する統計分析により、西日本高速道路株式会社関西支社では、2019年より設置後10年での定期交換を施策としている。しかしながら、設置個数が多いため、全ての電源ユニットに対して定期交換を実施できず、事後保全を余儀なくされている高速道路事務所も存在するのが実情である。そのため、故障履歴データを用いた設置環境と寿命の関係性の統計分析結果に基づき、現状では一律10年の定期交換間隔を高速道路事務所などごとに変化させることを検討し、定期交換実施費用及び人員負荷の低減を行うことが望ましい。また、電源ユニットの設置環境の改善 (例えば、結露防止のための湿度対策) により延命化を図ることも、維持管理費用の低減のための取り組みとして考えられる。

17. トンネル照明設備 避難誘導設備_誘導表示板 (バッテリー)

故障の時間依存性は高いが、故障自体の利用者への影響 (最大値)、復旧作業の困難性 (最大値) は、表-10の中では相対的に低い装置機器である。また、故障頻度は0.0018 [回/装置機器/年]、設置個数は5,308個であった。5.(3)で与えた閾値のもとでは、定期交換が適切な維持管理施策となる装置機器であるが、他の種類の装置機器と比べ故障頻度も高くないため、定期交換が適切な維持管理施策となる装置機器の中では、定期交換の必要性は相対的に低いものの、採用可能性は高い装置機器であると判断できる。

当該装置機器に関して、突発的な故障により機能停止した場合でも、道路運用に支障を与えないように対処するための知見を、一部の現場技術者は保有している。また、トンネル内の装置機器であるため、限られた交通規制の時間内に、突発的な故障への対処を行う必要があるという特性がある。これらの理由から、現状の維持管理施策が故障時順次補修となっていると考察できる。定期

表-11 予知保全への改善可能性のある装置機器のスクリーニング結果

番号	設備名	装置機器	現状の維持管理 施策	経過年数以 外の故障の 予兆の有無	故障自体の利 用者への影響 (最大値)	復旧作業の 困難性(最 大値)
35	ETC設備	発進制御機 駆動部 (サーボモータ)	故障時即時補修	51.0%	73.5%	30.6%
27	ETC設備	車両検知器 軸数センサ (踏板)	故障時即時補修	45.6%	63.9%	32.7%
25	ETC設備	無停電電源装置_蓄電池	故障時即時補修	44.2%	35.4%	84.4%
26	ETC設備	車両検知器 軸数センサ (ラインセンサ)	故障時即時補修	31.3%	57.8%	24.5%
7	自家発電設備	燃料フィルター	定期交換	24.4%	26.7%	48.9%
3	受配電設備	保護継電器 (静止型)	故障時即時補修	24.4%	28.9%	57.8%
5	自家発電設備	保護継電器	故障時即時補修	24.4%	35.6%	64.4%
28	ETC設備	車両検知器 光センサ (レーン幅 3.0m)	故障時即時補修	22.4%	72.1%	23.8%
29	ETC設備	車両検知器 光センサ (レーン幅 3.5m)	故障時即時補修	21.1%	71.4%	22.4%

交換の必要性が相対的に低いことから、実務において定期交換の可能性に関する検討はされていないが、本研究でのアンケート調査により定期交換の可能性が明らかとなった装置機器である。上述の特性を考慮すると、突発的な故障時に道路運用に支障を与えないような対処方法を各高速道路事務所に周知するとともに、個々の装置機器固有の構造・環境的要因により突発的な故障による道路運用への影響が免れない場合には、定期交換の導入を検討すべき装置機器であると考察できる。また、定期交換導入の検討の際には、限られたトンネル内交通規制で複数種類の装置機器の補修を同時に行うような同期化施策¹⁴⁾が有効となる可能性がある。

40. ETC設備 車線サーバ CPU バッテリー

故障の時間依存性は高いが、表-10の中で、故障自体の利用者への影響(最大値)が中程度、復旧作業の困難性(最大値)が低い装置機器である。また、故障頻度は0.0575 [回/装置機器/年]、設置個数は14,992個であった。故障の利用者への影響は中程度であるものの、故障の時間依存性と故障頻度を考慮すると、定期交換の必要性・採用可能性がともにある装置機器であると判断する。

当該装置機器に対しては、導入から十分な期間が経っていないため、NEXCO 関西支社は、将来的な定期交換の導入を見据えつつも、現在は定期交換周期を見定めるべく事後保全により維持管理を行っている。将来的に定期交換が導入できる可能性があるという現在の維持管理方針は、今回のアンケート調査結果とも整合的であり、アンケート調査結果により維持管理施策に関する現在の方針の妥当性が示されたと解釈できる。今後は、故障履歴データの統計分析及び数理最適化モデルにより定期交換間隔を策定し、定期交換へと移行してゆくことが望まれる装置機器である。

b) 予知保全への改善可能性

表-11に、適切な維持管理施策が予知保全となった15種類のうち、現状の維持管理施策が予知保全以外の9種類の装置機器を、それぞれの現状の維持管理施策、経過年数以外の故障の予兆の有無、故障自体の利用者への影

響(最大値)、復旧作業の困難性(最大値)とともに、経過年数以外の故障の予兆の有無の降順に示す。ここでは、経過年数以外の故障の予兆の有無の上位3位の装置機器を具体例として取り上げ、予知保全への改善可能性を以下で考察する。

35. ETC設備 発進制御機 駆動部 (サーボモータ)

復旧作業の困難性(最大値)は表-11の中では相対的に低い、経過年数以外の故障の予兆の有無、故障自体の利用者への影響(最大値)が高い装置機器である。また、故障頻度は0.0667 [回/装置機器/年]、設置個数は5,646個であった。これらのことから、当該装置機器は、予知保全の必要性・採用可能性がともに高い装置機器であると判断できる。

ETC設備の発進制御機は、交通量の多いインターチェンジで故障が多いことが(一部の現場技術者固有ではなく)全社的な経験的知見として知られており、レーン通過台数、発進制御機の動作回数を予兆とした予知保全の検討がNEXCO 関西支社により進められている。ただし、レーン通過台数、発進制御機の動作回数を予兆とした予知保全は、故障の予測精度や維持管理施策の実施体制の観点から、経過時間を予兆とした定期交換と類似した性質を持つ可能性もある。それに対する先進的な取り組みとして、発進制御機の発進制御バーへの衝突回数やその際の荷重を予兆とした予防保全の検討も併せて行われている。このような現在の検討の妥当性が本研究でのアンケート調査によっても示されたと考えられ、予知保全の実装に向けた検討を今後も継続してゆくことが望まれる。

27. ETC設備 車両検知器 軸数センサ (踏板)

復旧作業の困難性(最大値)は表-11の中では相対的に低い、経過年数以外の故障の予兆の有無、故障自体の利用者への影響(最大値)が高い装置機器である。また、故障頻度は0.1040 [回/装置機器/年]、設置個数は3,084個であった。これらのことから、当該装置機器は、予知保全の必要性・採用可能性がともに高い装置機器であると判断できる。

軸数センサは、ETC設備の各レーンに埋設設置されて

おり、車両通過時の通過軸数データを取得するための装置機器である。当該装置機器の故障として、検知の異常やゴム部品の損傷が考えられる。後者の故障は、利用者の快適性の低下につながるが、今回の調査結果で故障自体の利用者への影響（最大値）が高い値を取っているのは、当該装置機器の故障時には、補修のためのレーン閉鎖が必要であることが主な要因であると推察する。なお、ここでは、故障時の補修による利用者への影響も、故障自体の利用者への影響として取り扱う。この点は、例えば、表-6 の「1-2）復旧作業の困難性」に復旧作業の利用者への影響を直接的に問うような設問を追加するなど、設問内容を修正することにより、復旧作業の困難性として整理することも考えられる。当該装置機器に対しては、通過軸数の増加に伴い故障の発生確率も増加することが現場技術者により経験的に知られており、現在、西日本高速道路ファシリティーズ株式会社主導のもとで、通過軸数を予兆とした予知保全が検討されている。また、当該装置機器は、路面に埋設されているという形状、直上を通過する交通荷重及びそれに起因した振動により劣化が進展するという特性が、高速道路伸縮装置に類似しているため、伸縮装置に対する常時モニタリングのような手法¹⁸⁾と目視点検を併用した予知保全が可能となる可能性がある。当該装置機器では、故障時の補修の際にレーン閉鎖が必要となることから、装置機器の長寿命化を図ることが望ましいことに加え、埋設型以外のセンサによる代替可能性も併せて検討することが望まれる。

25.ETC 設備 無停電電源装置 蓄電池

故障自体の利用者への影響（最大値）は表-11 の中では相対的に低いが、経過年数以外の故障の予兆の有無、復旧作業の困難性（最大値）が高い装置機器である。また、故障頻度は 0.0222 [回/装置機器/年]、設置個数は 1,036 個であった。これらのことから、当該装置機器は予知保全の必要性・採用可能性がともに高い装置機器であると判断できる。

当該装置機器では、復旧作業の困難性（最大値）が特に高い値となっている。この点については、補修の際にバックアップが必要であること、突発的な故障への対処の際に現場技術者に感電の危険性があること（点検時にも同様の感電の危険性がある）、に起因していると推察できる。当該装置機器に対しては、1年に1度を基本とした点検（内部抵抗測定）が行われている。内部抵抗値の上昇が故障の予兆となり得ることは経験的に知られているが、1年間隔の点検データのみを用いた場合には故障の予測精度が十分でない（1年間に予期せず内部抵抗値が急増する場合がある）ため、故障時即時補修が行われている場合が多い。なお、一部の装置機器に対しては、内部抵抗値の基準値を超えた場合に予防的に補修を行っており、この維持管理施策は予知保全と捉えることがで

きる。しかしながら、このような定期点検結果に基づく予知保全では、故障の予測精度が十分でないため、内部抵抗値に対するセンサーを用いた常時モニタリングに基づく予知保全が検討・試行され始めている。常時モニタリングによる予知保全により、停電時の確実な電力供給、点検作業工数の削減に加え、点検時の感電等の危険性の低減といった副次的な効果も期待できる装置機器である。

7. おわりに

本研究では、膨大な種類の設備に関して、日常的に維持管理業務を行っている現場技術者の経験的知見をアセットマネジメントの継続的改善に活かすべく、現場技術者へのアンケート調査により、設備の特性を把握し、設備の種類ごとに適切な維持管理施策を決定するための方法論を提案した。その際、予防保全に該当する維持管理施策として予知保全及び定期交換、並びに事後保全に該当する維持管理施策として故障時即時補修及び故障時順次補修を定義し、それぞれの特性を説明した上で、設備の種類ごとに4種類の維持管理施策の中から適切な維持管理施策を選定した。また、現場技術者へのアンケート調査において、現状の維持管理施策を併せて調査することにより、適切な維持管理施策と現状の維持管理施策に乖離がある設備を抽出するようなスクリーニングを実施した。

上記の一連の方法論をNEXCO 関西支社管内の41種類の装置機器に適用し、個々の装置機器に対して、故障時の利用者への影響、故障の予兆の有無を把握することにより、適切な維持管理施策が決定できることを確認した。また、これら41種類の装置機器に対して、適切な維持管理施策と現状の維持管理施策の比較を行い、定期交換への改善可能性がある装置機器、予知保全への改善可能性がある装置機器を特定した。特定結果に対して、装置機器ごとに具体的な考察を行うことにより、アンケート調査結果及びその他の装置機器特性を総合的に考慮した維持管理施策の改善のための考え方を例示するとともに、i) 高度な維持管理施策の必要性が相対的には高くないが、高度な維持管理施策の採用可能性がある設備も提案方法論により抽出できる点、ii) アンケート調査により現状の維持管理施策の改善可能性があると判断された装置機器の一部では、維持管理施策の改善のための検討が実務において開始されているものもあり、そのような検討の妥当性がアンケート調査結果によっても確認できる点、がそれぞれ示された。

本研究に関連した今後の課題を以下で整理する：

より実践的な維持管理施策の改善の検討

本研究では、現場技術者へのアンケート調査の有用性を示したが、対象装置機器は41種類と限られており、

予算・人員制約や補修費用などの要素も考慮の対象外とした。今後は、分析対象を拡大するとともに、維持管理施策改善の実装、その効果のモニタリング、事後評価に基づく更なる改善を繰り返し、アセットマネジメントの継続的改善を図ることが望まれる。

アセットマネジメントのためのデータの蓄積・整備

本研究においても、故障履歴データなどのデータを活用したが、設備によっては、例えば、台帳データには機器単位で記録があるものの、故障履歴データには、装置単位でのみ記録があるなど、台帳に記載された単位と異なる単位で故障履歴が記録されているものもあった。定期交換や予知保全の導入を検討する際にも、データに基づく意思決定が必要となり、これらのデータ記録方式を改善することにより、維持管理施策が改善してゆくと考えられる。

現場技術者へのアンケート調査結果の更なる活用

本研究では、アンケート調査結果において、平均値や最大値を取るような処理をした項目が複数ある。それに対して、個々の回答結果の分散などにも着目することにより、高速道路事務所ごとの維持管理施策のばらつき度合いの分析や、現場技術者それぞれのアセットマネジメントの力量把握にも、本研究におけるアンケート調査が活用できる可能性がある。

参考文献

- 1) 青木一也, 山本浩司, 小林潔司: 劣化予測のためのハザードモデルの推計, 土木学会論文集, No.791/VI-67, pp.111-124, 2005.
- 2) 青木一也, 山本浩司, 津田尚胤, 小林潔司: 多段階ワイブル劣化ハザードモデル, 土木学会論文集, No.798/VI-68, pp.125-136, 2005.
- 3) 前田典昭, 河村圭: 簡易動的マクロモデルによるトンネル照明設備の健全度予測, 土木学会論文集 F4 (建設マネジメント), Vol.71, No.1, pp.19-32, 2015.
- 4) 山本浩司, 青木一也, 小林潔司: 道路付帯施設アセットマネジメントシステム, 土木情報利用技術論文集, Vol.15, pp.173-184, 2006.
- 5) 青木一也, 山本浩司, 小林潔司: トンネル照明システムの最適点検・更新政策, 土木学会論文集, No.805/VI-69, pp.105-116, 2005.
- 6) 青木一也, 山本浩司, 小林潔司: 時間依存型劣化過程を有するシステムの集計的最適点検・補修モデル, 土木学会論文集 F, Vol.62, No.2, pp.240-257, 2006.
- 7) 水谷大二郎, 川崎洋輔, 佐津川功季, 中川岳士, 梅田祥吾, 生嶋理恵, 桑原雅夫: 利用者の経済損失を考慮した高速道路情報板の維持管理施策の簡易的評価手法, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol.76, No.5, pp.I-127-I-139, 2021.
- 8) 平川恵士, 水谷大二郎, 貝戸清之: 異質性を考慮したトンネル照明灯具の劣化予測, 照明学会誌, Vol.97, No.11, pp.706-714, 2013.
- 9) 小林潔司, 水谷大二郎, 松島格也, 山本浩司, 貝戸清之, 坂口創: 2次元混合ワイブル劣化ハザードモデル, 土木学会論文集 F4 (建設マネジメント), Vol.72, No.2, pp.47-62, 2016.
- 10) 貝戸清之, 山本浩司, 小濱健吾, 岡田貢一, 小林潔司: ランダム比例ワイブル劣化ハザードモデル: 大規模情報システムへの適用, 土木学会論文集 F, Vol.64, No.2, pp.115-129, 2008.
- 11) 山本浩司, 青木一也, 貝戸清之, 小林潔司: 劣化現象を考慮した大規模交通管制システムの動的故障解析, 土木学会論文集 F, Vol.64, No.3, pp.295-310, 2008.
- 12) 織田澤利守, 山本浩司, 青木一也, 小林潔司: 道路付帯施設の最適補修同期化政策, 土木学会論文集 F, Vol.64, No.2, pp.200-217, 2008.
- 13) 平川恵士, 水谷大二郎, 小濱健吾, 貝戸清之: 非定常な点検間隔を考慮した高速道路トンネル照明設備の最適点検・更新施策, 土木学会論文集 F4 (建設マネジメント), Vol.71, No.3, pp.162-181, 2015.
- 14) Li, Z.: *Transportation Asset Management: Methodology and Applications*, CRC Press, 2018.
- 15) 株式会社高速道路総合技術研究所: 令和元年度施設設備年報 平成 30 年度データ解析, 2020.
- 16) 山本浩司, 貝戸清之, 青木一也, 小林潔司, 菱田憲輔: 陳腐化を考慮した大規模情報システムの最適更新戦略, 土木学会論文集 F, Vol.65, No.2, pp.264-283, 2009.
- 17) Mizutani, D., Nakazato, Y. and Lee, J.: Network-level synchronized pavement repair and work zone policies: Optimal solution and rule-based approximation, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol.120, 102797, 2020.
- 18) 小林潔司, 貝戸清之, 水谷大二郎, 坂井康人: 長期記憶性を考慮した時系列データによる構造物劣化過程のモデル化, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol.75, No.4, pp.233-249, 2019.

(Received September 30th, 2021)

(Accepted)

POSSIBILITY OF IMPROVING MANAGEMENT POLICIES FOR EXPRESSWAY FACILITIES BASED ON QUESTIONNAIRE SURVEY OF ON-SITE ENGINEERS

Rie IKUSHIMA, Daijiro MIZUTANI, Koki SATSUKAWA, Yosuke KAWASAKI and Masao KUWAHARA

In this study, a methodology is proposed to select the types of expressway facilities that have the possibility of improving management policies based on a questionnaire survey of on-site engineers. Expressway managers are required to manage a large number of different types of facilities. It is, however, difficult to identify the appropriate management policy for each facility through detailed analysis of the historical failure data. In this study, we define four possible types of management policies, and then conduct a questionnaire survey on the characteristics of facilities to on-site engineers who routinely carry out maintenance work, in order to simply identify the appropriate management policy for each type of facilities. It is then to be confirmed that the proposed methodology enables us to identify appropriate management policies for each type of facilities, and to screen facilities for potential improvements in current management policies based on the results of the questionnaire survey.