

変状の相互作用を考慮した
高速道路マネジメントに関する研究

梶間 厚邦

2019年

目次

第1章	序論	1
1.1	本論文の背景	1
1.2	本論文の目的	9
1.3	本論文の構成	11
第2章	高速道路構造物マネジメントの実践における課題と方策	15
2.1	緒言	15
2.2	保全事業システムの制度設計（理念）	16
2.2.1	変状の発生特性	17
2.2.2	リスク事象の発生特性	20
2.2.3	構造物マネジメントの制度上の改善	20
2.3	構造物マネジメントの構造化と課題	23
2.3.1	保全事業システムの構造化	23
2.3.2	構造模式図作成の具体的手順	25
2.3.3	構造模式図の作成結果	29
2.3.4	システムに起因する構造的課題	34
2.3.5	変状を対象とするマネジメントの必要性	44
2.3.6	人の限定合理性に起因する課題	46
2.4	課題解決に向けての改善方策	56
2.5	結言	59
第3章	変状の発見過程及び変状と補修行為との間の相互作用	63
3.1	緒言	63

3.2	本章の基本的な考え方	65
3.2.1	既往研究の課題	65
3.2.2	構造物マネジメント上の課題	68
3.3	高速道路構造物における変状発生	70
3.3.1	変状特性	70
3.3.2	変状の時間的発生状況分析	72
3.4	変状相互間の関連性に関する分析	74
3.4.1	変状発生状況の変状別時間特性	74
3.4.2	補修による変状発生の抑制効果	77
3.5	マネジメントと変状発生の関連性分析	81
3.5.1	未補修変状数と年間補修量の関係性	81
3.5.2	意思決定における限定合理性	82
3.6	結言	88
第4章	変状数の有限性を考慮した変状発生モデル	93
4.1	緒言	93
4.2	本章の基本的な考え方	94
4.2.1	既往研究の概要	94
4.2.2	潜在的変状の有限母集団仮説	97
4.3	変状数発生確率モデル	98
4.3.1	モデル化の前提	98
4.3.2	状態空間クラスの定式化	99
4.3.3	潜在的変状数分布モデル	101
4.3.4	潜在的変状顕在化確率モデル	104
4.3.5	尤度関数	106

4.4	適用事例	108
4.4.1	適用事例の概要	108
4.4.2	データの1次分析	111
4.4.3	モデルの推計結果	111
4.4.4	漏水系変状に関する分析結果	113
4.4.5	剥離系変状に関する分析結果	116
4.4.6	構造物マネジメントへの活用方法	118
4.5	結言	120
付録 4.A	補足説明	121
付録 4.B	式(4.12)の導出	122
第5章	コンクリート橋梁に対する補修遅延の影響評価分析	127
5.1	緒言	127
5.2	本章の基本的な考え方	130
5.2.1	既往研究の概要	130
5.2.2	高速道路構造物の変状特性と研究対象	131
5.2.3	構造物劣化における因果関係の特性	132
5.3	補修遅延の影響評価モデル	134
5.3.1	モデル化の前提条件	134
5.3.2	ワイブルハザードモデル	135
5.3.3	複合ワイブルハザードモデル	136
5.3.4	尤度関数	140
5.4	MCMC法によるモデルの推計	142
5.4.1	完備化操作	142
5.4.2	事前・事後確率密度関数の設定	145

5.4.3	条件付き事後確率密度関数	146
5.5	適用事例	148
5.5.1	適用事例の概要	148
5.5.2	データの1次分析	149
5.5.3	複合ワイブルハザードモデルの推計結果	152
5.5.4	補修による延命効果	155
5.6	結言	157
付録 5.A	MCMCによるモデルの推計フロー	158
第6章	結論	165
	謝辞	171

目次

1.1	未補修変状数の推移	7
1.2	リスク事象発生数の推移	8
2.1	資産年齢構成	17
2.2	総変状発生数の内訳	18
2.3	橋梁（コンクリート）の全変状の主要変状種別内訳	19
2.4	リスク事象発生数（構造物別）	19
2.5	保全事業システムの構築の具体（主としてルール上の改善）	22
2.6	ループ構造の分析結果	32
2.7	保全事業システムの構造図	35
2.8	保全事業費の推移	55
2.9	構造物マネジメントの概要（変状のマネジメントの必要性）	58
3.1	構造物別の経過年数別変状発見数	72
3.2	変状種別別の経過年数別変状発見数	75
3.3	変状発生数と過去全補修済数の関係	77
3.4	年間補修率と未補修変状数との関係	83
3.5	年度当初未補修変状数と新規変状発生数の関係	87
3.6	思考実験の結果	88
4.1	状態空間クラス概念図	100
4.2	顕在化した変状数が m となる状態集合	102

4.3	漏水系の累積変状発生数と経過年数の関係 (左：全体図，右：拡大図)	110
4.4	剥離系の累積変状発生数と経過年数の関係 (左：全体図，右：拡大図)	110
4.5	累積変状発生数と経過年数の関係	114
4.6	橋梁 A の累積変状発生数に対する確率分布図	116
4.7	累積変状発生数と経過年数の関係	118
5.1	変状発生過程における因果関係	133
5.2	剥離系変状に対する 1 次分析結果	151
5.3	漏水系変状の生存関数	153
5.4	剥離系変状の生存関数	153
5.5	補修の遅延時間と延命効果の関係	155

表目次

2.1	集合 M の要素	30
2.2	$d_p(m, m)$ と S_p	31
3.1	変状種別の系への分類	74
3.2	管理小区間（事務所別かつ路線別で分割）と区間特性	78
3.3	直近の変状発生数と補修行為ならびに区間特性の関係	79
3.4	直近の変状発生数と漏水未補修数の関係	80
3.5	マネジメント要因と年間補修率の関係	85
3.6	単回帰分析の結果	85
3.7	年間補修率に関する回帰モデル	86
4.1	変状特性	109
4.2	特性変数候補の詳細	111
4.3	モデルの推計結果	112
5.1	変状種別の変状系への分類・集約	132
5.2	変状の発生と補修の因果関係に基づく場合分け	134
5.3	変状特性	148
5.4	特性変数候補の詳細	149
5.5	ワイブル劣化ハザードモデルの推計結果	150
5.6	複合ワイブルハザードモデルの推計結果	152
5.7	因果関係に基づく分類別橋梁数	156

第1章 序論

1.1 本論文の背景

近年、インフラ資産の老朽化の進展と、それに起因する問題が多発しており、インフラ資産の効果的・効率的なマネジメントの必要性が叫ばれており、都市間高速道路（以下では、単に高速道路という）においても、この言葉どおりの状況にある。しかしながら、ある日突然こうした状況に陥った訳ではなく、そうなるまでにはそうなるための理由・原因と時間経過があり、それに対処してきた人々の行動の歴史があって、それらの上に現在の危機感を禁じ得ないような状況に至っているはずである。したがって、現在生まれている状況は必然のものとは考えられず、適時・適切な対処が施されていれば、異なる現在も当然あり得たはずである。

こうした視点から、構造物老朽化に対する動きの近年の経緯・背景を振り返って整理してみると、2003年（平成15年）に国交省提言「道路構造物の今後の管理・更新等のあり方」が出され、『荒廃する日本』という言葉で警鐘が鳴らされ¹⁾、2008年（平成20年）には橋梁有識者会議から「道路橋の予防保全に向けた提言」が出され、『見ない』『見過ごし』『先送り』という当時の維持管理上の問題点が指摘され、近い将来の人命の危険にまで言及された²⁾。この頃、日本道路公団では、1999年（平成11年）より、様々な道路本体構造物や道路附属物から部位の一部が落下するという事象が顕在化し始めたことから、外部有識者から成る「道路構造物点検に関する検討委員会」を設置し、2001年（平成13年）度以降は点検間隔5年の打音点検を導入する等、点検手法の改善を順次実行に移してきている。また、2004年（平成16年）頃からはARM 3（Advanced Road Maintenance Management

Method) と RIMS (Road maintenance Information Management System, 点検管理システム・橋梁マネジメントシステム等から構成) という, 新たなアセットマネジメント構築への動きを着実に進めていた. その後, 道路関係公団民営化による混乱が落ち着いてきた 2011 年 (平成 23 年) に, 西日本高速道路株式会社 (以下, NEXCO 西日本という) として改めて本格的に維持管理の変革に取り組もうとなったのが, 本研究全体の背景にある「保全事業システム」(点検から補修およびその記録に至る一連の業務の開始から完了までを管理する業務システムであると定義. 本論文においては, 主として NEXCO 西日本に限定して議論する場合に保全事業システムを用い, 一般論として述べる場合には構造物マネジメントという用語を使用する.) と命名されたアセットマネジメントシステムである. こうした流れの中で, 2012 年 (平成 24 年) に「高速道路資産の長期保全および更新のあり方に関する技術検討委員会」³⁾ が設置され, 高速道路のマネジメント方法の改善に関する指針と制度がとりまとめられたが, 大規模更新等の議論を開始した矢先に, 笹子トンネル天井板崩落事故が発生した. この事故を受けて, 世の中全体にインフラメンテナンス改革の動きが加速され, 国全体の一連の動きに NEXCO 3 社も同調しながら, 2013 年 (平成 25 年) 度に「点検実施基準および資格に関する検討委員会」⁴⁾ が設置され, この 2 つの委員会での結論も含め, 保全事業システムを確立するための様々な対応策を立案し, 実行してきているのが 2018 年 (平成 30 年) 現在である. 国全体としては, その後, 2013 年 (平成 25 年) に国交省の「社会資本の老朽化対策会議」において『社会資本メンテナンス元年』が宣言され, 2014 年 (平成 26 年) には社会資本整備審議会道路分科会から『最後の警告』と称される提言が出され⁵⁾, 2018 年 (平成 30 年) 現在, メンテナンスサイクルは『セカンドステージ』に進んだとされており, 『点検はしたけれど…』という言葉に象徴される, 次の新たな課題に対処すべき段階に至っているところで

ある。構造物の老朽化はゆっくりと忍び寄って来るという表現が最も適すると思われるが、そのせいで変化に気づき難く、そのため変化に追従することが難しくなり、結果として適切な対応ができないせいで、老朽化に関する諸問題が発生しているのではないかと考えられる。このように考えると、劣化に対する理解・認識の甘さが今日の劣化状況を生んでいる主原因である可能性がある。そして、老朽化の波は近い将来の避け難い確定的な現実であり、笹子TN事故は起こるべくして起き、必要な措置を講じなければ、いつの日かあらゆる構造物がとんでもない事態を引き起こす危険性を持っていると認識した上で、現時点において、これを未然に防止し戦略的に対峙できるように、変化に対応できる意識と力と体制と手段をNEXCO西日本グループ全体の中に構築・担保するための行動を起こすべき、というのが保全事業システムに要請されたことである。NEXCO西日本の内部では、このような背景を非常に分かり易い例え話である「茹で蛙」理論⁶⁾を借用して、保全事業システムの必要性・重要性を説明している。

一方、アセットマネジメントの制度面に関しては、2013年（平成25年度）には国際標準型アセットマネジメントISO55000シリーズ（以下、ISO5500xという。）がほぼその姿が明確となり⁷⁾、NEXCO西日本では2018年（平成30年）現在まだ認証は得ていないものの、保全事業システムの構築に際してはその精神に則って制度設計を行い、その継続的改善を図っているところである。

以上のような背景の下で、高速道路の構造物マネジメント（アセットマネジメントの幅広い概念のうち、構造物老朽化に対応する部分を、以下では「構造物マネジメント」と呼ぶ。）が構築され、様々な施策を進めてきたが、制度面、人的資源、力量などの面から、様々な課題もまた抱えているところである。比較的先行していると考えられる高速道路のマネジメントにおいても、上述の国交省提言から数えて約15年の年月が経過した現在において、なお課題が山積しているという

状況は、その期間の長さで現状の不十分性そのものが、この問題に対処することの難しさを物語っている。高速道路が現在陥っている問題に世の中全体が気付き始め、直面した時に、高速道路で行われてきた考察・実践およびそこから得られた知見は今後大いに役立つものになり得るものと考えられる。NEXCO 西日本が直面している課題は、具体には、補修が合理的・効率的・適時・的確に行われ得ないという課題である。先述した「点検はしたけれど…」の状況に、保全事業システム構築の前、また構築後においても一定程度の改善は見られるものの同様な状況に陥っている。平易な言葉で言い換えるならば、「今日やるべきこと」が明確にできずに、また「今日やる」という確かな意思が持てずにいる状態にあると言え、その背景にあるのは「人は不合理な存在である」という問題ではないかと考えられる。構造物マネジメントの一環として進められている大規模更新・修繕（高速道路リニューアルプロジェクト）についても、両刃の剣の要素を持っており、それは将来の道路管理に大いなる安心感を与え、老朽化に対峙する上で新たな強力な武器となり得る一方で、そこに至るまでの構造物への向き合い方を誤ると、リスクが却って大きくなってしまふ欠点も併せ持つ。より詳細には、大規模更新に頼り過ぎる意識が強くなり過ぎると、大規模更新の対象とはなっていない構造物や部材、相当先の更新予定の構造物に対する、従来はできていたきめ細やかに対処する意識までもが徐々に薄れて行くことの懸念である。人の心理面の問題は後述することとするが、現状を見る限りにおいて、自らを強く律して、大規模修繕が意図している『予防保全の精神』（対語として用いられる事後保全というのは実は余り悩まずに済むある意味楽な管理の状態であり、一方、当面さほど困らない予防保全の実践というのは、分析・検討や意思・強制力等を必要とする自制心に基づく利他的な行動様式であり、実は相当骨の折れる管理手法に他ならない）に則って行動できる者は限定的であると考えられ、大規模更新・修繕という管理手

段への移行は危険な側面を持っているものであるとも言える。なお、大規模更新は構造物の老朽化に対する冷静な判断と言える一方で、技術者としては未然に十分に対処し切れなかったという点において、従前の維持管理手法の敗北であるとも言え、このような認識を持つておくことも今後の管理の在り方を考える上では重要である。しかしながら、そのような意識が広く共有されていないこともまた一つの問題であろうと考えられる。

一方、土木構造物の維持管理技術の面においては、力学や材料学の面から、鋼部材の疲労、コンクリート床版の疲労、塩害、アルカリシリカ反応、中性化などの材料劣化に対する研究が進められ、その都度、基準・規制等が制定・変更されてきている⁸⁾。また、既に供用されている構造物に関しても、構造的補強、再アルカリ化、脱塩、電気防食、防水工、表面処理工などの補修技術も確立・改良されているところである。しかしながら、実在する構造物の劣化進行には予測困難な誤差が含まれており、初期欠陥の程度問題の現実への寄与度は相当程度に大きいため、現実の変状データに基づいて、統計的・確率的に劣化現象を解明しようとする動きも近年急速に進んでいる。具体には、ハザードモデル⁹⁾やマルコフ過程¹⁰⁾等の確率モデルである。しかしながら、問題は、これらの知見が維持管理の現場でどの程度有効に機能しているかである。構造物マネジメントの現場で働く人々のうち、責任ある立場の人の過半数においては力学的・材料学的知見の表層的な理解はあるように感じられるが、それぞれの劣化の状態が現実のどの構造物に今該当しており、先述した誤差を含めて今後どのような劣化過程で推移して行くのかについては、補修優先順位策定の上で必要な個別の解を与えてくれるものにはなっていないようである。一方、現実の観測値に基づく確率モデルについては、実際のデータ解析の難解さ故に遍く普及できる技術ではないことに加えて、今後の変状数の規模の推移予測や、いつまでにどれを補修するのが合理的・効率的な

のか、第三者被害を出さないためにはどうすれば良いのか、どうすれば劣化進行に対して定常的な状況を生み出せるのか等の本来重要である個別補修（大規模更新を実施する前の個別変状に対する予防保全的補修）を進める上で、具体的に欲している解を与えてくれるものにはなり得ていない。したがって、力学・材料学等の知見の上に観測データに基づく確率的分析を融合させ、構造物マネジメントを効率的・合理的に実行するための、個別変状に対峙する具体的方策を与えてあげることがあるものと考えられる。

ISO5500xにおいて、アセットマネジメントとは、「組織として調整された活動」とされ、意思決定を適切なものとするプロセスを確立すべく、保全事業システムにおいても、ルール化・体制整備・ツール整備・強制的施策実行・監視体制構築を中心に進められてきた。しかしながら、調整の方向性の明確化が現状まだ不十分であるとともに、人はロボットではなく思惑通りには動かないという根源的な特性を持つことが、問題解決を難しくしている背景にあるものと考えられる。ここには平成30年7月西日本豪雨における避難行動における問題点と類似した難しさがある。さらに、我が国はハイコンテクスト社会の典型とされ、業務遂行においても依然「以心伝心」や「暗黙知」に基づき行われることが現実が多いものと考えられる。しかしながら、そうした慣習や文化が、明確な意思の伝達を妨げ、論理や客観性よりも過去からの習慣的なものを優位に位置付けてしまい、さらに変化すべき時に際しては変革への意識が有効に機能し辛くなる方向で作用するものと考えられる。したがって、このような文化に基づく社会において変化を求める際には、よりいっそう明示的・論理的に、反駁できないような根拠の下で指示する必要があり、受け取る側も同様に従来の受け取り方を改める必要があるものと考えられる。以上のような事柄を踏まえると、構造物マネジメントの対象である相手（構造物）を正確にまず知った上で、その特性に基づいて人の行動を律する方

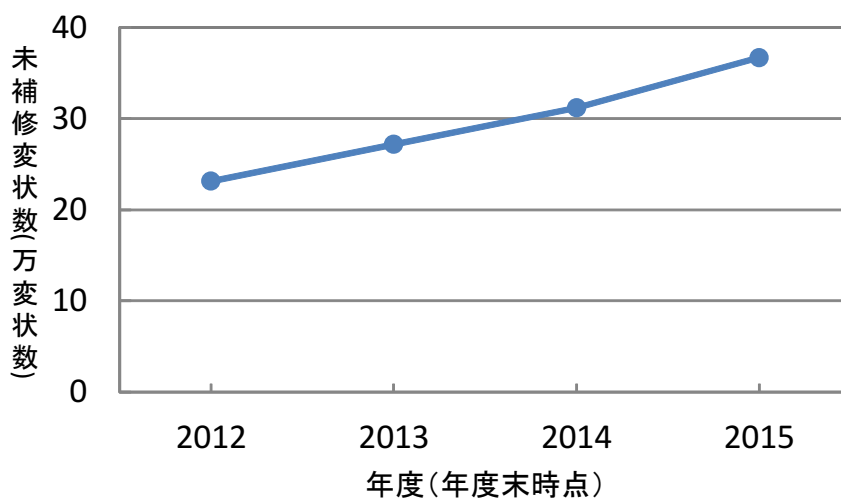


図 - 1.1 未補修変状数の推移

策を考えることが必要となり、受け取る側の納得感（これは持続性の担保に繋がる点において重要）や同一のベクトルの組織末端までの浸透・徹底を図り、ISOで言うところの運用のプロセスの適正化を図ることの必要性が浮かび上がってくる。人は多分に情緒的であり、感情的であり、情報処理能力には限界があって、判断には偏りが付き物である。名神高速道路の開通から50有余年、それなりに問題なくやって来られたのも厳然たる事実としてある。しかしながら、劣化のステージが明らかに変わりつつあると考えられる現状およびその将来において、従前のままでいては対処困難な事態に陥るのは様々な事実・指標から見て明白であり、それが笹子トンネル事故に代表されるリスク事象の多発であり、一般道に多く見られる多数の橋梁の通行制限等の実態¹¹⁾に現れていると考えられる。

具体的に課題を課題として認識するためには、構造物マネジメントの状態あるいは変化の方向性を評価するための指標に基づく必要がある。図-1.1は、2.2.1に示す高速道路範囲を対象とした、未補修変状数（本論文でいう変状は、コンクリート標準示方書⁸⁾の「変状：本来あるべき姿でない状態。初期欠陥，損傷，劣化等

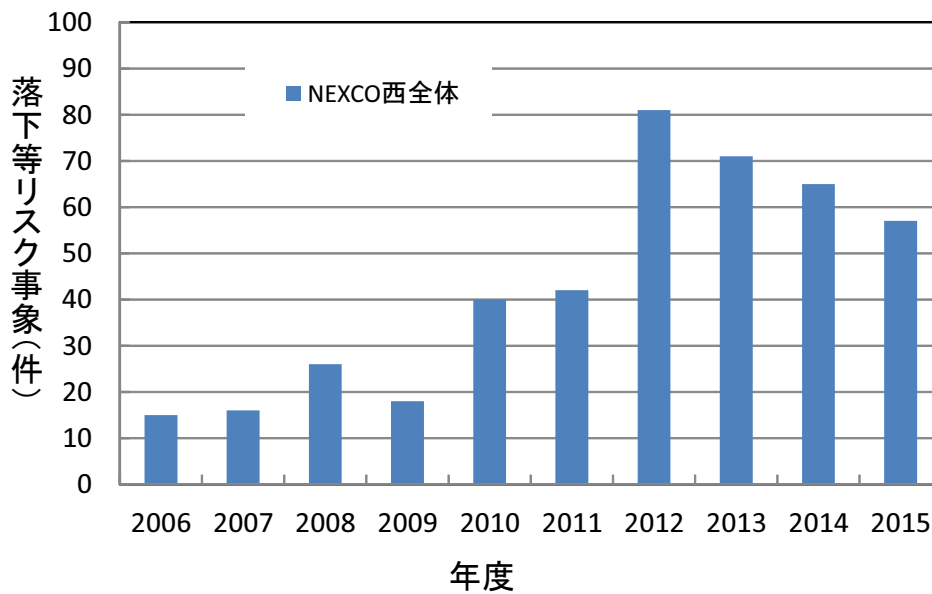


図 - 1.2 リスク事象発生の変移

の総称。」の定義に基づいている)の累積推移であり、変状発生に補修が追いつかない、あるいは適切な優先順位で補修ができていないせいで、近年増加傾向を示している。ただし、本図は全変状を対象とした経過観察の判定区分も含んだ変状数であるため、厳密な意味での「未補修」変状数ではない。しかしながら、最初の変状発見後、経過観察を続けてきた分のさらなる質の低下を含んだデータである。この状態が、元に戻れなくなる(状態が収束することがない)臨界点を越えた結果なのか、まだそこまでの状態に至ってはいないのかは不明であるが、感覚的には非常に厳しい状況にあることが現場の人達からは感じられ、臨界点が刻一刻と近付いて来ているとの認識が必要な可能性もある。また、図-1.2は、NEXCO西日本全体の、コンクリート片の落下や路面損傷でタイヤがパンクした等の近年のリスク事象の発生傾向であるが(ただし、第三者被害に直結したものは極めて少ない)、こちらもかなりの勢いで増加傾向を示し、保全事業システムの推進により暫時減少基調にはなりつつあるものの、潜在的リスクを適切に把握あるいは

認識できずにいて、補修の優先順位を誤っていることが背景にあることが理解できる。これらの詳細は、第2章において詳述することとする。

1.2 本論文の目的

本論文は、アセットマネジメントという幅広い概念のうち、「賢く使う」等のストック効果的な概念以外の、構造物の老朽化に対処する領域（構造物マネジメント）を対象とする。また、分析の対象とするのは高速道路の構造物マネジメントであり、そこでのNEXCO西日本における改善行動とその結果に対して考察と分析を加えることを通して、一般論としての構造物マネジメントに共通のあるべき姿を探求することを目的とする。加えて、マネジメントを適切に実行するためには、様々な分析を必要とすると考えられるが、そうした分析を可能とするために、どのような内容・項目を備えたデータの蓄積に努めるべきかの示唆を与える一助にもなり得るのではないかと考えられる。具体には、NEXCO西日本の保全事業システムを題材として、構造物マネジメントの必要性はもとより、構造物マネジメントを適正なものとするためには何が重要なポイントとして存在するのか、人やシステムはどういう特性を有するのか、劣化に適切に対峙するためには何が欠けていて、何を知り、人はどう対応して行くべきなのかについて、実際の改善行動の中における考察を通じて明らかにする。

構造物劣化は、物理現象としての領域と人為の領域との双方に跨って進行する。それ故、構造物マネジメントには、人のマネジメントと変状のマネジメントの両輪が必要となるのではないかと考えられる。人のマネジメントはISO5500x等の手法を用いれば適正化が概ね可能となる。一方、変状規模を適正な状態に保つマネジメント等を確立することも同等に必要で、より重要であろうと考えられる。したがって、変状を適正な状態で維持させることを目的に据えて、人のマネジメン

ト（組織として調整された活動）も方向付け・修正されることが必要である。「今日やるべきことを今日やる」という言葉は異論を挟む余地のない言葉かと思われるが、これを分解すれば「今日やるべきこと」を「今日やる」に分けられ、それぞれ「変状と補修」に関する要素、「人の意思決定」に関する要素に相当すると考えられ、この両者が同時に解決できる方法であることが望ましい。「今日やるべきこと」を示すためには、変状と補修データに立脚した情報分析が必要になり、未補修変状が発散傾向を示すのは経過年数に応じた構造物固有の性質なのか、あるいは人為の領域を含んだ相互作用の問題なのかを明らかにする必要があると考えられる。「今日やる」という強い意志を堅持し続けるためには、「今日やるべきこと」の必要性を現実のデータに基づき納得感を持って理解させ、人の心の部分の難しさを理解した上で、強固な意思決定が行われるように適切に誘導して行かなければならないであろう。

以上のような視点から、本論文では、まず、本章で示した課題に対して、その発生原因はどこから生じているのか、課題を解決するには何が重要なポイントとなるのか等について、NEXCO 西日本の保全事業システム構築の制度設計および構造物マネジメントのあるべき構造の抽出を踏まえて、サイクルが回るとは具体的にはどういうことを意味しており、実際の運用面においてシステムにはどういう根源的・構造的な問題を内包しているのかについて考察する。それに対して、ルール化だけでは対処できない残されている問題は何で、その原因はどこにあるのか、についてさらなる考察を加え、人の限定合理性等の問題に対処し適切な意思決定を導くためのマネジメント方策を検討する。さらに、その後の各章において、このマネジメント方策を順次明確にして行くこととし、まず、過去から現在までの変状発生過程を明らかにする。次に、変状発生における変状間の波及・増幅関係、変状発生と補修行為との間の相互作用を明らかにする。さらに、変状発生の未来

を確率的手法を用いて予測するとともに、劣化原因や危険変状を特定し、その上で、未来はどうすれば変えられるのかの視点から、変状発生における変状間の因果関係に基づいた補修による延命効果について確率的に評価する。こうした補修行為を内包した形での変状に対する研究と、現実の変状データに基づいた確率論的アプローチによる客観的・定量的な理解が、管理者が正しい危機感・期待・展望を持つことに繋がり、変状発生のコントロール可能性等の確信の下で「今日やるべきことを今日やる」という、管理者・実務者双方に納得感ある合理的判断に基づく構造物マネジメントが実現されて行くための一つの方法論を確立することを目的とする。

1.3 本論文の構成

以上に示したような、背景と目的の下、第2章において、変状・劣化進行に対峙する行動の歴史、構造物マネジメントにおける課題の認識、課題解決に向けての現実の具体的行動、構造物マネジメントのあるべき姿のグラフ理論を用いた構造化、および理念やルール上の性善説に基づく改善だけでは十分に解決できない課題（人の限定合理性等）の存在等について考察・分析を加え、その上で適切なマネジメントを実行するために認識すべき、人やシステムの背後にある根源的問題点と、変状を対象とするマネジメント（変状数定常化サイクル、新規変状発生コントロール方策等）の必要性について明らかにする。第3章においては、変状の過去から現在までを主な対象とし、変状のマネジメントの具体の例示として、変状の発生原因、変状発生の時間的特性、変状発生における変状間の波及・増幅関係、補修行為と変状発生との相互関係、および補修行為に影響する累積未補修変状数の作用についての、重回帰分析等による統計的手法を用いた分析を踏まえて、変状発生抑制と変状数定常化サイクル（合理的な構造物マネジメント）の実現可

能性について考察する。第4章では、変状発生の未来について論じることとし、変状の有限性をテーマに、潜在変状数の有限母集団仮説に基づく変状発生の確率モデル化による推定・将来予測と、予測結果に基づく構造物マネジメントの具体的方策、新規変状発生抑制のために劣化要因等に対してなすべき事項等について客観的・確率的に認識するための方法論を提案する。第5章では、第4章で示した未来を変えるための人為の力に焦点を当て、確率モデル化による変状発生における変状間の因果（波及・増幅）関係の確率的内部構造の理解と、そのための方法論、さらに推計結果に基づく変状間の因果関係に及ぼす人為（補修行為等）の影響度の大きさとあるべき姿、すなわち、新規変状発生コントロールという構造物マネジメント方策の実現可能性について明らかにする。第6章において、物理現象の領域と人為の領域の両者を含んだ分析を行って始めて、人のマネジメントと変状のマネジメントの同時解決が図れ、構造物マネジメントにおける意思決定を適正なものとしていくことの意義について、総合的なまとめを行う。

なお、本論文全般に亘って得られた知見は、著者独自のものであり、西日本高速道路株式会社の公式な見解ではないことを予め申し添えておく。

参考文献

- 1) 道路構造物の今後の管理・更新等のあり方に関する検討委員会：道路構造物の今後の管理・更新等のあり方提言，2003.
- 2) 道路橋の予防保全に向けた有識者会議：道路橋の予防保全に向けた提言，2008.
- 3) NEXCO 3 会社：高速道路資産の長期保全及び更新のあり方に関する技術検討委員会報告書，2014.
- 4) NEXCO 3 会社：点検実施基準及び資格に関する検討委員会報告書，2015.
- 5) 社会資本整備審議会道路分科会：道路の老朽化対策の本格実施に関する提言，2014.
- 6) 桑田耕太郎，田尾雅夫：組織論，有斐閣，1998.
- 7) 小林潔司，田村敬一，藤木修：国際標準型アセットマネジメントの方法，日刊建設工業新聞社，2016.
- 8) 土木学会：コンクリート標準示方書 維持管理編，2013.
- 9) 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キング，土木学会論文集 A，Vol.64，No.4，pp.857-874，2008.
- 10) 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.
- 11) 国土交通省：老朽化対策の取組み，2016.

第2章 高速道路構造物マネジメントの実践における課題と方策

2.1 緒言

本章では、第1章で示した課題や問題点をより詳しく掘り下げ、課題等の発生原因は何から生じているのか、課題を解決するには何が重要なポイントとなるのか等について、NEXCO 西日本の保全事業システム構築に際しての制度設計およびその結果に関する具体事例に基づき考察する。第1章で示した評価指標に見られる課題は、保全事業システム構築後も依然継続した問題となっている。その主要部分は、補修が的確になされない、という点にある。補修が的確になされることを目指して制度設計されたものであるのに反し、必ずしも画期的な効果を挙げられている訳ではない。後述する保全事業システムで付加された仕組みは内容的にはISO5500xと同等レベルにあると考えられる。したがって、そこにはルール化等の仕組み・枠組みを構築しただけでは克服できない、別の要因が潜んでいると見るべきである。さらに、それは何であり、どこから生まれて来るものかについて省察し、新たな方策を講じる必要がある。

本章における考察の流れは、以下のようなものである。まず、点検から補修に至るメンテナンスサイクル上のどのポイントに問題の発生原因があるのかを明確にするために、あるべき構造の模式化を行う。その上で、サイクルが回るとは具体的にはどういうことを意味しており、実際の運用面においてシステムにはどういう根源的・構造的な問題を内包しているのかについて考察する。それに対して、システム構築当初に行ったルール化・制度設計はその問題に対してどこまで網羅できて

いるのか、ルール化だけでは対処できない残されている問題は何で、その原因はどこにあるのか、についてさらなる考察を加える。最後に、人の限定合理性等の問題を加えて、総合的に対処するための技術的方策を検討する。以上のような考察と検討に基づき、現実の変状データに基づいた客観的・定量的な理解が、管理者が正しい危機感・期待・展望を持つことに繋がり、変状のコントロール可能性の確信の下で「今日やるべきことを今日やる」という、管理者・実務者双方に納得感の高い合理的判断に基づく構造物マネジメントが実現されることを目的に、人やシステムについて省察するものである。本章で述べる構造物マネジメント構築に際しての考察と方法論は、一般論としても、アセットマネジメントを構築しようとする現場において、大いに参考とできる知見を与えるものになり得るのではないかと考える。

2.2 保全事業システムの制度設計（理念）

第1章において、現状、累積未補修変状数が発散傾向にあることや、リスク事象（顕在化、潜在的）が急激な増加を示し、種々の施策実施後も必ずしも十分な減少が図られていないことを示した。本章では、そうなる原因、人やシステムの背景にある根源的な問題について様々な視点・側面から考察を加えることとする。ただし、その前に、1.2で述べたとおり、相手を正確にまず知った上で、その特性に基づき人為の側の問題として人の行動（補修行為）を律する方策を考えることが重要となると考えられるため、課題抽出の前段階として、上述の状況に至らしめている、変状とリスクの現状についての整理を最初の段階で行っておくこととする。

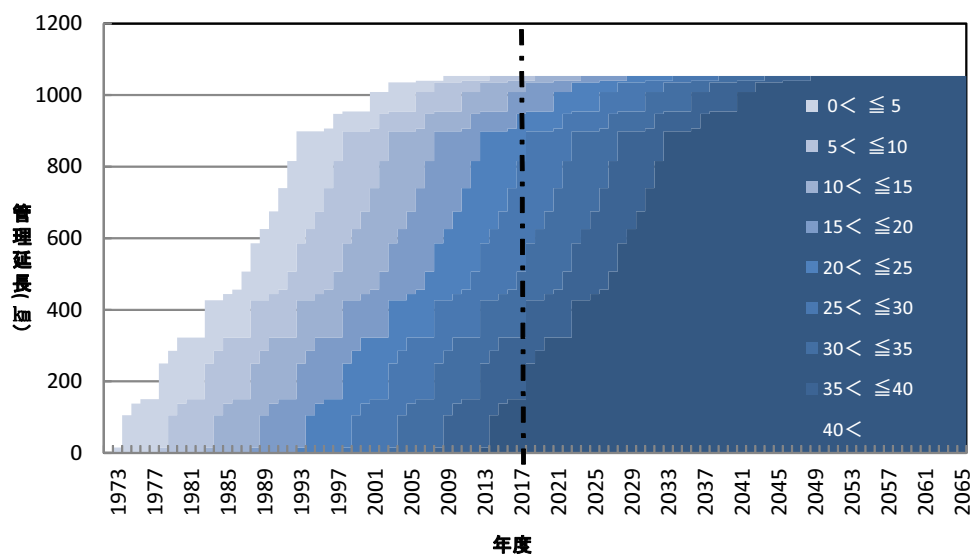
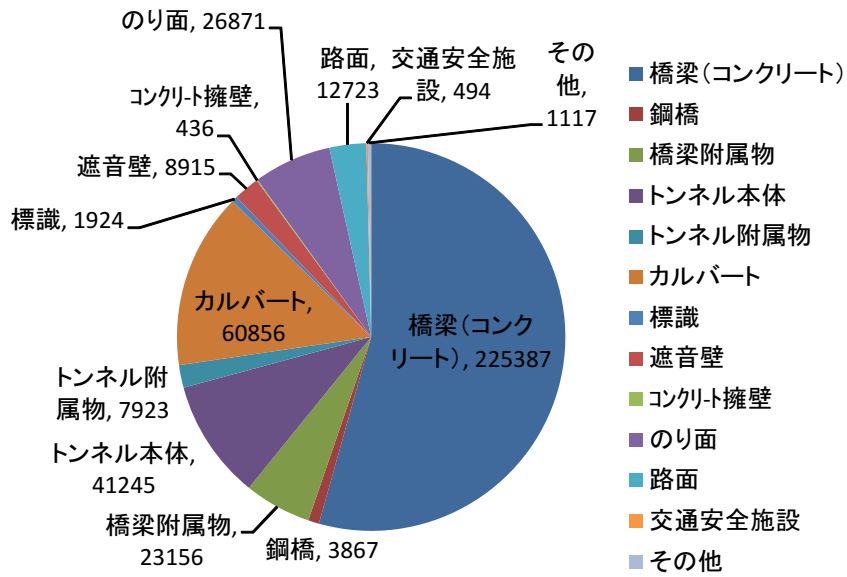


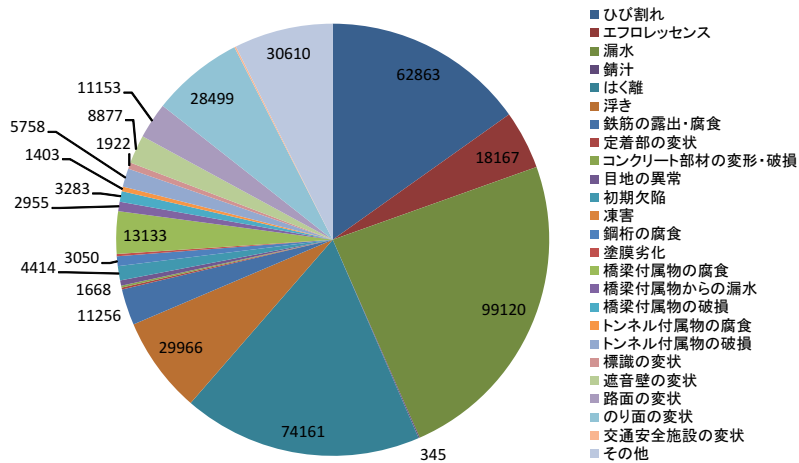
図 - 2.1 資産年齢構成

2.2.1 変状の発生特性

本論文全体に亘って使用するデータは、NEXCO 西日本管轄のある地域の高速道路の変状発生データである。当該区間の管理延長は 1,054km である。図-2.1 に、その資産年齢構成を示す。橋梁・トンネル等を主な点検対象とする詳細点検が基本 5 年に 1 回の頻度で行われ、その都度、網羅的に新たな変状の発生と劣化度の進行度合いが記録・保存されている。本研究で分析対象とするのは、図-2.2 に示す、平成 28 年末時点までに詳細点検で発見された変状新規発生数とその累積数である。概略的には、橋梁の変状発生数が最も多く 6 割以上を占め、カルバート・トンネルがそれに次いでいる。しかしながら、本論文における問題の本質は、内訳よりもその総数にあると考えられる。具体には後述するが、これまでに 400 千個所を超える変状が発生しており、それが構造物マネジメントのメンテナンスサイクル上のあらゆる場所に、それぞれ異なる補修需要（補修を実行すべき時点までの猶予時間）を持って存在していることが、構造物マネジメントの適正な優先順位の判断に種々の障害を起こしているものと考えられる。なお、発生変状は点検



(a) 構造物別内訳



(b) 変状種別内訳

図 - 2.2 総変状発生数の内訳

の度に判定し直され、判定の区分に応じた補修時期の目安がNEXCO西日本においては定められている。図-2.3には、図-2.2で最も変状数が多かった、橋梁（コンクリート）の変状種別別の変状発生数を表しており、漏水や剥離・浮きが多数

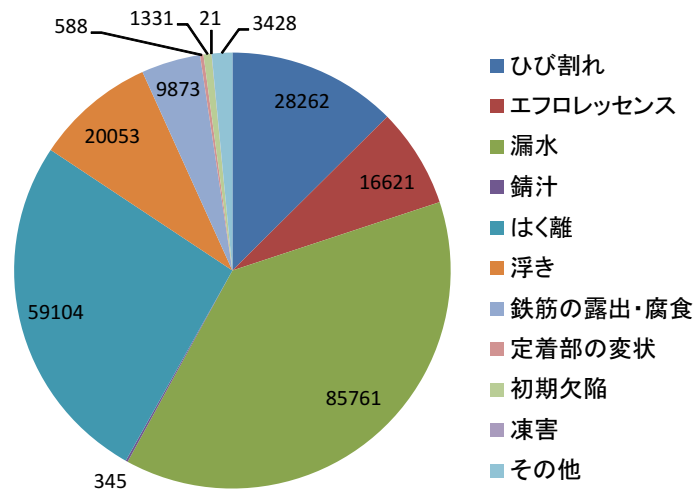


図 - 2.3 橋梁（コンクリート）の全変状の主要変状種別内訳

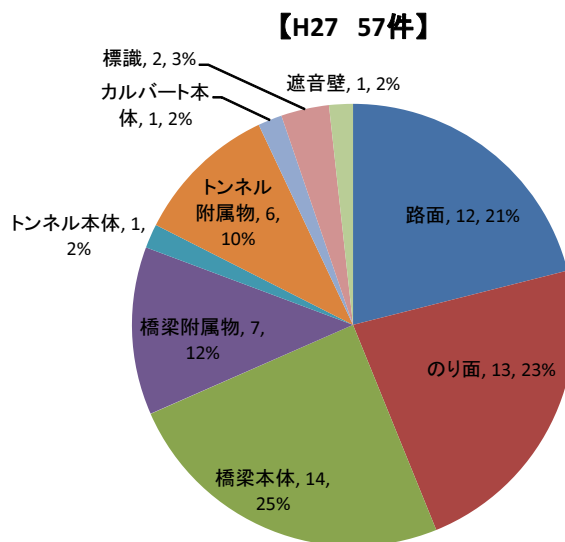


図 - 2.4 リスク事象発生数（構造物別）

を占めていることが分かる。以後の分析，モデル推定においては，これらの変状を対象として行う。

2.2.2 リスク事象の発生特性

図-2.4 は、第三者被害に直結していない事象も含めて、平成 27 年度に発生したリスク事象の構造物別内訳を示している。リスク事象は、すべての構造物を対象としており、詳細点検だけではなく日常点検等も対象となるため、路面変状に伴うリスク事象等も含まれている。より重要な点は、何故発生したのか、という点にあるが、通常、問題の発生が予期できていないから問題は発生するのであって、NEXCO 西日本内部での原因分析においてもほとんどは気付いていない（これは点検の不十分性というよりも、むしろ変状発生情報の管理者側での補修必要性の認識漏れによるところが大きい）ところでリスクは発生しており、リスクが起きて初めて問題が存在していたことに気付いている。変状の全体像が正しく把握されていないままの補修計画策定・補修優先度の判断は、全体としては的確なものとはなり得ず、結果的に低い優先度としたもの、あるいは補修計画に盛り込まれてすらいらない部分において、リスク事象等の問題を起こしているのが現状の姿であると言える。橋梁有識者提言で「見ない」「見過ごし」「先送り」と指摘された状態から脱却することが、保全事業システムが目指すものであり、その出発点として必須の「資産状態の常時全貌把握」を点検から補修に至るまでの全ての関係部署が常に心掛け、それを可能とする体制・技術力・情報伝達のルールとツールを準備しておくことの重要性が、この点から理解できる。

2.2.3 構造物マネジメントの制度上の改善

保全事業システムの構築に話を戻すと、NEXCO 西日本では、2.2.1、2.2.2 に示した変状発生数やリスク事象に適切に対処するべく、ISO5500x の概念に準じてルール化を図り、継続的改善が可能となる体制を構築する等の、システムの初期状態となるものを 2012 年（平成 24 年）から 2014 年（平成 26 年）に掛けて構築

し、2018年（平成30年）現在は継続的改善の真最中である。しかしながら、そもそも従来から保全サイクルは存在していた訳で、構造物があり、点検し、補修する、という流れは当然あって、保全事業システムの構築と言っても、新たな何かを作るということにはなり得ず、新たな要素を従来サイクルに付加していく再構築という形を取らざるを得ない。図-2.5に、システム構築の出発点として付加した具体的内容を示す。制度設計をする上での目標、あるいは具備すべき要件を総括的に述べると、目的が満足できるようにルールとツールと力を整えること、自律性と永続性が担保できるよう意図されていること、継続的な監視が行われ、任意の場所・時点におけるギャップ・齟齬が常に解消に向かうよう仕込まれていること、等が挙げられる。その上で、具体的に付加した内容としては、規程上欠落した主語の定義と曖昧性の排除、責任者の役割・責任・（自らを守るための）心構えの明示、意識改革の訴求、暗黙知の形式知化（文書化）¹⁾、ツール・データベースの整備、データの精緻化、意思決定会議の創設、力学・材料学に留まらない危機察知能力なども含めた力量の向上、健全度評価・大規模更新修繕の導入、補修マニュアル類の整備、施策実行における強制性の付与、目的の明確化、本来必要事業費の把握と確保、入札不調に対する制度改善、グループ会社に対する業績評価と組織間競争原理の導入、組織的狀態監視、役員による全体監視等である。ただし、改善の行為内容としては、従前の規定の改定となるため、新たなルール作りとツール整備と体制強化に留まり、具体的実行内容は強化組織の裁量に任せ、それぞれの改善項目の達成レベルにまでは言及していない。しかしながら、上述の具体的な改善項目は、一般論としてもアセットマネジメント（再）構築において参考になり得るものであると考える。

保全事業システムは、点検等によって、構造物の状態が変化するという情報を得ることによって動き出す。システムが回るということは、資産状態が変化した

2.2 保全事業システムの制度設計（理念）

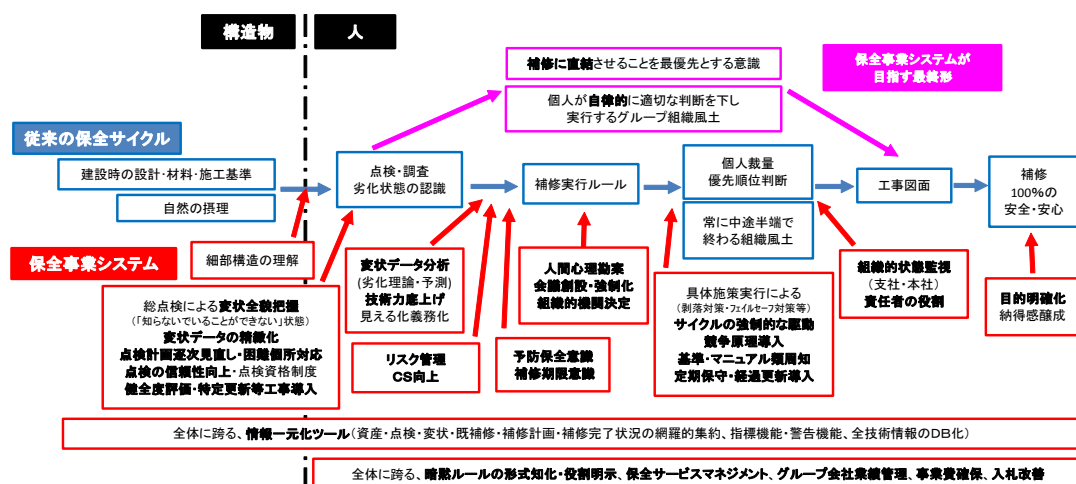


図 - 2.5 保全事業システムの構築の具体（主としてルール上の改善）

という情報が、補修という一つの到達点に達するまで、それぞれに必要なスピードでシステム内を流れて行くことに他ならない。すなわち、100%の安全・安心に至るまでの、情報伝達・加工、優先順位判断・意思決定、図面作成・契約行為、等の情報伝達が、それぞれ必要な伝達速度でもって行われ、それらが適切かつ持続的に担保されるシステムでなくてはならない。さらに、それぞれの段階において、網羅性、確実性、適時性、効率性、合理性、合目的性、納得感・持続可能性、強制性・自発性、といった必要な特性が満足されるよう、ルール化される必要がある。NEXCO 西日本においては、以上のような事項に配慮し主としてルールと枠組みの改善を講じてきたところである。しかしながら、図-1.1、図-1.2に示した現状に見られるように、画期的な改善効果が結果として表われているようにはない。ルールや枠組みを中心とする制度面の改善は、人の行動変化に期待することとなるが、その点が期待通りになっていないことが背景にあるものと考えられる。この点について、次節以降でそうなる構造や原因についてより詳細に分析する。

2.3 構造物マネジメントの構造化と課題

2.3.1 保全事業システムの構造化

保全事業システムは適切に情報伝達を行うための仕組みである。この仕組みを動かすのも、この仕組みに動かされるのも人であり、人は意識がなければ動かない。したがって、ロボットやコンピュータのように指示通りに動く保証のない人の意識と行動の変革が何よりも重要となる。そのため、保全事業システムはこの点に主眼を置いて、**1.2** および **2.2.3** で示したように、体制基盤・制度基盤・事業費基盤・思想基盤・技術基盤・情報基盤をそれぞれ再構築した上で、意識の変革を迫り、具体の施策を半強制的に実行し、それらを組織的に監視していく等のスキームを再構築したものである。時間的には前後するが、**2.2.3** で示した保全事業システムの制度設計に際しては、まず最初に、あるべきシステム構造を定め、模式化を行うこととした。その過程を仔細に振り返ることを通して、**2.2.3** において実行した理念やルールや枠組みだけの性善説に基づく改善の限界点を本節では究明する。

現在運用し、継続的に改善中の保全事業システムは多くの要素（ここでいう要素とは、計画や行動などの行為、また、変状情報といった行為の結果としての状態の項目を表す）から成り、当該要素に関係する意思決定主体は多岐にわたる。例えば、点検計画は主として事務所レベルで意思決定が行われ、点検実施はグループ会社によって行われ、変状分析は主として支社レベルで行われるが、これら一連の要素は全て保全事業システムの中に含まれている。したがって、保全事業システムの構造を特定し継続的な改善を図るためにその全容を知ろうとした場合、事務所レベルで立てた点検計画がグループ会社によって実際の点検業務として実施されるといった直接的な関連性は容易に把握できるものの、その後の要素にどのような影響を与えているのかといった間接的な関連性の把握までは必ずしも容

易ではない。しかしながら、直接的な関係性をベースに、間接的な関係性、すなわちシステムの全体構造を纏め上げることは可能である。さらに、纏め上げたシステムの最適化を論じるに当たっては、システムが目指すものは何か、サイクルが回るとはどういう状態を指すのか、サイクルを動かす駆動力・推進力とは何か、システムの適正性は結果の適正性と手続きの効率性のどちらに重きを置くべきか、ルール上の問題と運用上の問題とを分離して考える必要性、などの項目についても考慮しながら、適切なシステム構造は検討される必要がある。さらに、システムの表現手法も、問題を明確化するためには非常に重要な意味を持つ。要素間の直接的な関係を用いて複雑なシステム構造を検討する場合、一般的に、各要素の関係性を階層構造によって表現することが多い。本研究においても、管理者が制御できない要素を含む階層（入力：外生変数）、管理者が制御できる要素を含む階層（PDCA ループ）、管理者が目指すべき目標である要素を含む階層（出力：目標）と大きく3層に分類する。その上で、PDCA ループ階層（以下、ループ階層という。）を詳細に分析するため、ループ階層内の要素を2つの種類（行為、状態）、2つの区分（人為に深く係る区分、変状に深く係る部分）へと分類し、また、各要素間の関連性を区別（行為の順序を表す場合、情報等の収集・伝達を表す場合等）して表現する方法をとる。これにより、PDCA ループが「行為→行為の結果としての状態→状態からフィードバックされた行為→…」の流れを形成し継続的改善が図れる構造となっているか否かを判定することができると同時に、PDCA ループに生じる課題の抽出を容易にすることができる。

本節では、以上に示した、結果の適正性や構造の冗長性や表現上の留意点を勘案して、保全事業システムを構成する多くの要素の直接的な関連性から保全事業システムのあるべき全体構造を検討し、そこからそれに内包される構造的課題点を探り出し、具体の課題を抽出する。構造模式図の作成に当たっては、上記方針

に則ってまず各要素を3つの階層に分類し、次に、ループ階層に属する要素間のループ構造を特定する。その上で、要素間の直接的な関連性を3つの矢印へと分類し、最後に、ループ階層に属する要素を2つの種類、2つの区分へと分類し、構造模式図の基本部分を完成させる。さらに次の段階の作業として、サイクルの駆動力の視点から必須となる要素や、システムからの出力の適正性に関する要素等を明確にし、以上を踏まえて、トレードオフの関係性にあるシステムの効率性と出力結果の適正性の両面からループとしての最適性を検証し、さらに結果の適正性を担保するのに必要と考えられる要素を付加する。最後に、確定したシステムのあるべき全体構造を踏まえて、ルール上の課題と運用上の課題とを別の視点から捉えることによって、図-1.1 および図-1.2 に示すような問題を生じる原因（抵抗要素）はどの部分に起因して存在するのかについて考察し、サイクルが効率的に回り適正な出力を得ることを阻害する（見えない存在としての）システムと人の背後にある課題を探り出す流れで、構造物マネジメントの問題点を究明する。

2.3.2 構造模式図作成の具体的手順

a) 前提条件

保全事業システムに含まれる要素を外生変数階層、ループ階層、目標階層へと分類し、ループ階層に含まれる要素を $n(n = 1, \dots, N)$ とする。各要素 n に対して、要素間の直接的な関連性 $c_n(i)(i = 1, \dots, N)$ や、関連性がある場合にはその流れの種類などの情報が含まれていると考える。ただし、 $c_n(i)$ は要素 n が要素 i に対して与える影響の有無を表し、

$$c_n(i) = \begin{cases} 1 & \text{要素 } i \text{ に影響を与える時} \\ 0 & \text{それ以外の時} \end{cases} \quad (2.1)$$

を満たすとする。

b) ループ構造を形成している要素の抽出

ループ階層内に存在する要素の中で、実際にループ構造を形成している要素を抽出するために、ループ階層内の要素間の関連性を表す隣接行列 $\mathbf{C}^{(2)}$ を

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} c_1(1) & \cdots & c_1(n) & \cdots & c_1(N) \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_n(1) & \cdots & c_n(n) & \cdots & c_n(N) \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_N(1) & \cdots & c_N(n) & \cdots & c_N(N) \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

と作成する。さらに、 $N \times N$ 行列 \mathbf{H} を、

$$\mathbf{H} = \times_N \mathbf{C} \quad (2.3)$$

と定義する。ただし、記号 \times_N はブール演算により行列 \mathbf{C} を N 回乗ずる演算を表す。この時、行列 \mathbf{H} の対角要素 $h(n, n) (n = 1, \dots, N)$ において、 $h(n, n) = 1$ を満たす要素 n の集合 \mathcal{M} が、ループ階層内において実際にループ構造を形成している要素の集合となる。

c) ループ構造の特定

集合 \mathcal{M} の要素を $m (m = 1, \dots, M)$ とする。各要素が具体的にどのようなループ構造を形成しているかを特定するために、先ほどと同様に要素間の直接的な関連性 $c'_m(j) (j = 1, \dots, M)$ を

$$c'_m(j) = \begin{cases} 1 & \text{要素 } j \text{ に影響を与える時} \\ 0 & \text{それ以外の時} \end{cases} \quad (2.4)$$

と表し，隣接行列 C' を

$$C' = \begin{bmatrix} c'_1(1) & \cdots & c'_1(m) & \cdots & c'_1(M) \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c'_m(1) & \cdots & c'_m(m) & \cdots & c'_m(M) \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c'_M(1) & \cdots & c'_M(m) & \cdots & c'_M(M) \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

のように作成する．次に，要素数 $p(p = 1, \dots, M)$ のループの存在の有無，および存在しているのであればそのループを形成している具体の要素を以下の考え方に基づいて特定していく．隣接行列を p 回乗じたとき，対角要素が1以上となる要素は，要素数 p となるループを形成している．要素数 p となるループから，同一経路を辿るループを除外することにより，要素数 p かつ単純閉路となるループを特定する．またその際，要素数 p かつ単純閉路となるループが2つ以上存在する場合，より詳細な分析によりループを特定しなければならない．具体的な手順は次の通りである．

Step0

ループ構造を分析したい集合 M に対して隣接行列 C' を作成し， $p = 1$ とする．

Step1

以下の手順にてループを特定するための判定行列 D_p を作成する． $p = 1$ のとき $D_p = C'$ とする． p が素数のとき $D_p = C'^p - C'$ とする．上記以外のと

き, p を $p = q_1^{x_1} \times q_2^{x_2} \times \dots \times q_{z_p}^{x_{z_p}}$ の形に素因数分解し,

$$D_p = \begin{cases} C'^p - C'^{q_1^{x_1-1}} & (z_p = 1 \text{ のとき}) \\ C'^p - \sum_{k=1}^{z_p} C'^{q_k^{x_k}} + (z_p - 1)C' & (z_p > 1 \text{ のとき}) \end{cases} \quad (2.6)$$

とする.

Step2

行列 D_p の対角要素を $d_p(m, m) (m = 1, \dots, M)$ とし, 対角要素の和 $S_p = \sum_{m=1}^M d_p(m, m)$ を計算する.

Step3

S_p および $d_p(m, m)$ の値に対して, 以下の3つの case を考える.

$$\begin{cases} \text{case1 } S_p = p \\ \quad \text{かつ } d_p(m, m) \leq 1 (m = 1, \dots, M) \\ \text{case2 } S_p = pr (r = 2, 3, \dots) \\ \text{case3 } \text{上記以外} \end{cases} \quad (2.7)$$

case1 では, $d_p(m, m) = 1$ を満たす p 個の要素がループを形成している.

case2 では, 要素数を p とするループが2つ以上存在する可能性があるため,

$d_p(m, m) \geq 1$ を満たす要素を抽出し, 要素間の関係を詳細に分析後, ループ

を特定する. case3 では, 要素数 p となるループは存在しない

Step4

$p < M$ であれば, $p = p + 1$ とし, **Step1** に戻る. $p = M$ であれば, ループ構造の分析を終了する.

以上のようにしてループ階層に存在するループ構造を特定する.

d) 構造模式図の基本部分の完成

ループ階層内においてループを形成していない要素，すなわち，行列 H の対角要素 $h(n, n)$ において常に $h(n, n) = 0$ を満たす要素を前項で特定したループ構造に追加していく．次に，システムの駆動力の存在を勘案しつつ，目標階層への出力が適正であるかといった適正性の観点から，ループ構造を形成する要素が現状で十分たり得るかを慎重に検討する．その後，要素と矢印を **2.3.1** に示した方針に則り区分して，構造模式図の基本部分を完成させる．

e) 構造模式図の完成

最後に，保全事業システムのサイクルが動く・サイクルを回すという視点からの実運用上での課題を明確にし，また，それらが前項で完成させた構造模式図の基本部分の各要素からどのような影響を受け，各要素に対してどのような影響を及ぼすかを検討し，図に追加していき構造模式図を完成させる．

2.3.3 構造模式図の作成結果

a) 構造模式図の基本部分の作成

保全事業システムを構成すべき最低限必要となる要素を考え，その要素集合を3つの階層へと分類し，さらに，ループ階層に属する要素集合から実際にループ構造の形成に寄与すると考えられる要素を抽出した結果，表-2.1 に示す集合 M が得られた．先述した手順に沿って， $d_p(m, m)$ と S_p を計算した結果を表-2.2 に示す．ただし， $S_p = 0$ となる p は省略している．ループ構造を抽出する際，要素数 p が大きくなるにつれ，すでに抽出したループ構造を再度含むようなループ構造を抽出する場合が多くなる．そこで，必要に応じて，すでに抽出したループ構造が抽出されないように特定の経路を切断する操作を実施した．具体的に，表中 $p = 10$ に

表 - 2.1 集合 M の要素

要素名	要素番号	影響を与える要素番号
点検計画	1	2
点検実施	2	3
個別判定/健全度評価	3	4,15
データベース	4	5
変状データ分析	5	6,7
点検計画見直し	6	1
劣化予測	7	8,9
LCC 分析	8	10
保全サービスマネジメント	9	10
短中長期補修計画	10	11,12
自律系作業	11	11
優先順位判断	12	13
年度実行計画・5ヵ年計画	13	14
工事図面作成	14	15
補修実行	15	16
補修情報登録	16	2,4,17
補修効果検証	17	7

においては、要素数 4 のループと要素数 6 のループを共に含むような要素 2, 3 の存在により、要素数 4 のループと要素数 6 のループで形成される 2 つの閉路が要素数 10 のループとして抽出されていた。そこで、3 から 15 への経路を切断 ($c_3'(15) = 0$ と) した。表中の ° はリンクの切断操作を実施したことを表し、切断したリンクは表-2.2 の注釈に記載している。表-2.2 を用いて抽出したループ構造を図-2.6 に示す。図中赤矢印が要素数 p となるループを表している。ループ 1 は自働系（清掃等の定期的作業）のループであった。ループ 2 は補修に際し特段の検討を要さない簡単な保全工事（伐採，路面小補修等）のループであった。ループ 3 は点検見直しのループであった。ループ 4 はループ 2 の保全工事に対して事後的な分析を追加したループであった。ループ 5, 6 は点検による現状把握を前提とした上での補修実行のループであった。ループ 7 はループ 6 に点検計画，点検実施も含めたループであった。同様にして要素数 13~17 の時の $d_p(m, m)$, S_p を計算し，ループ構造を抽出した結果，ループ 7 で特定化したループがループ階層内での最も大きなループ構造であり，システムの全体像の骨格部分を形成していることがわかった。

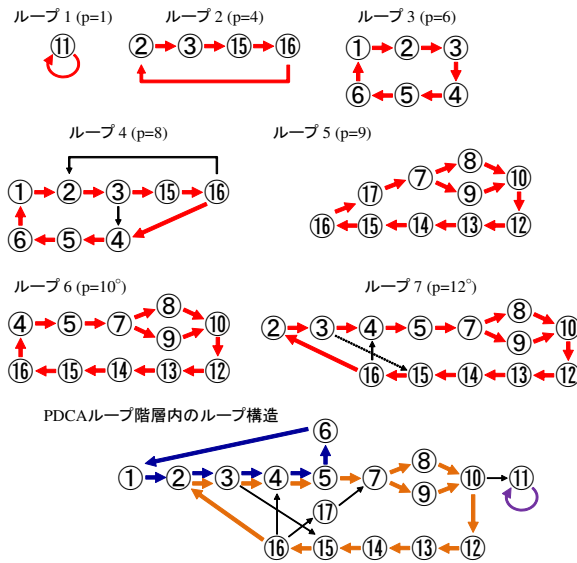
次に，サイクルが動く・回るという視点から必須となる駆動力に関する要素を

表 - 2.2 $d_p(m, m)$ と S_p

$d_p(m, m)$	p									
	1	4	6	8	9	10	10°	11°	12°	
1	0	0	1	1	0	1	0	0	0	
2	0	1	1	1	0	2	0	0	2	
3	0	1	1	1	0	2	0	0	2	
4	0	0	1	1	0	3	2	0	2	
5	0	0	1	1	0	3	2	0	2	
6	0	0	1	1	0	1	0	0	0	
7	0	0	0	0	2	2	2	0	2	
8	0	0	0	0	1	1	1	0	1	
9	0	0	0	0	1	1	1	0	1	
10	0	0	0	0	2	2	2	0	2	
11	1	0	0	0	0	0	0	0	0	
12	0	0	0	0	2	2	2	0	2	
13	0	0	0	0	2	2	2	0	2	
14	0	0	0	0	2	2	2	0	2	
15	0	1	0	1	2	3	2	0	2	
16	0	1	0	1	2	3	2	0	2	
17	0	0	0	0	2	0	0	0	0	
S_p	1	4	6	8	18	30	20	0	24	

注) $p = 10^\circ$, $p = 11^\circ$ のとき $c'_3(15) = 0$,
 $p = 12^\circ$ のとき $c'_3(15) = 0$, $c'_6(1) = 0$ としている。

勘案しつつ、システムからの出力の適正性に関する要素の必要十分性を検討することで、トレードオフの関係性にあるシステムの冗長性と出力結果の適正性の最適な関係性について検証する。以下では、抽出したループ構造の中で特に重要なループであると考えられるループ1, 3, 7について詳細に検討する。まず、ループ1に関して、資産の平均年齢が上がった結果、点検して変状が見当たらないということが皆無という現状からすると、変状は必ず発生することを前提に置いて、点検を逐一介さずに定期的に補修をしてしまう維持管理手法もあり得て、自律系の小ループ（定期保守・経過更新等）の積極的導入が有効と言える。これは定期的を実施するという駆動力が働いているため、現状の清掃系業務と同様に基本的にはグループ一任による遂行が可能となる。次に、ループ3によって表される要素数6の点検PDCAループ（点検計画→点検実施→個別判定・健全度評価→データベース→変状のデータ分析→点検計画見直し→点検計画）に関しては、ループ階層を適正化させるために、現地の状況を把握する点検の的確さの確保が重要な出発点となるといった意味で重要なループである。このループは現状見直すべき点



注) 点線矢印は分析時に切断した経路を表している。

図 - 2.6 ループ構造の分析結果

はないと考えられる。なお、この点検見直しループには自働的に働く駆動力・推進力が存在せず目標とは隔たりが大きいため、人の積極的関与が必要なサイクルとなっていると言える。すなわち、ルール上の適正性の担保は容易であるが、運用面では別の駆動力を与えなければならないループであることを意味している。次に、点検から補修に至るまでの一連のループであるループ7は、先述したようにループ階層内中で最も大きな要素数 12 のループ構造である。ループ7からこれ以上要素を減らすことは、各項目内容を鑑みれば不適当と考えられる。すなわち、変状発生と同時に全てを補修できるほどの人的資源や事業費環境が現状ないだけでなく、リスク事象多発の現状を考えれば補修の優先順位の検討は重要であり、大規模更新・修繕事業が導入された現在では補修に対する様々な選択肢があるため、多少の時間と手間は掛かっても、劣化進展予測やリスク管理や経済性を踏まえて適切な優先順位を検討した上で、補修実行に移す必要がある。なお、点検結果には補修時期の目安が設定されているので、このループには駆動力はあり、また安全・

安心という目標とも直接繋がっているので自働的に駆動するループである。しかしながら、現状抱えている問題からすると、運用段階においてこの駆動力を上回る抵抗力が存在することになり、これについては後で詳しく考察を加えることとする。さらに、結果の適正性の点を鑑みれば、ループ7を形成する要素だけでなく、リスク管理やリスク分析、CS（顧客満足度）分析、経営の参画、建設時・修繕時の情報、設計基準・材料基準・施工基準の変遷、協働体制最適化等を含んだより大きなシステムの流れについても、マネジメントの適正化のために機能させる必要があると考えられるため、これらの要素を追加する。その他のループについては、簡単な保全工事のループや、先述した重要なループの要素を目的に応じて減少させたループであるため、詳細な検証は省略する。以上のようにループ階層内の重要なループ構造を特定化した結果を図-2.6に示している。ループ階層内のループ構造を特定化した後、先述したように、要素間の直接的な関連性を3つの矢印へと分類し、要素を2つの種類、2つの区分へと分類した。さらに、外生変数階層の要素、目標階層の要素も追加し、構造模式図の基本部分を完成させた。これは保全事業システムの現実の全体構造であり、以上の検証を踏まえるとあるべき構造であると言える。

b) PDCA ループ階層における課題の追加

ループ階層内のループ構造は流れの順番を表している。PDCA ループがうまく回るためには、「行為→状態→状態からのフィードバック→…」といったスパイラルアップの流れが形成されている必要がある。ループ構造は適切な流れとなっていると考えられるため、ループがうまく回らないのは状態からのフィードバックが適切に実施されていない（阻害要因がある）ためであり、そこに大きな課題があると考えられることができる。図-2.6に青色矢印で示すループ（以下、ループ青）

は点検のループである。点検の結果として、変状情報がデータベースに蓄積され、分析により得られる劣化速度やリスク事象からの反省を含めてフィードバックを実施し、次の点検計画の見直しに繋がるループである。ループ青においては、リスク事象（図-1.2）と深く関係する「データの信頼性」といった課題を挙げる事ができる。図-2.6に橙色矢印で示すループ（以下、ループ橙）は点検・補修の大ループである。ループ橙においては、「データの信頼性」に加え、補修優先順位判断の結果としての「データ認識の不十分性」や「未補修ストック」の規模（図-1.1）に関する課題が考えられ、そこには優先順位判断に大きく影響する「人の心」に関する阻害要因も想定され得る。このようにして課題を抽出し、各課題と各要素の関係性も考慮して構造模式図の基本部分に追加した結果、図-2.7に示す保全事業システムのあるべき構造をベースとする課題を包摂した全体構造図が得られた。図中、赤枠実線（行為の関連）及び赤枠点線（状態の関連）で示される項目が課題である。課題は大きくAからGの項目で分類しており、その詳細については2.3.4にて説明する。

2.3.4 システムに起因する構造的課題

以下では、図-2.7に基づき、システムを構成するループ群を順に伝達されて行く変状データを矢印に沿って動かし、現実に動いている業務を時間軸を追って注視し、実際の分析等の行為内容やそれを受けての実際の人の反応等を観察することによって、的確な補修実行を可能とするために重要な課題として考えられる事項を整理する。具体には、システムのルールや枠組みの面では適正性が担保されているはずなのに、運用段階において問題を生じる抵抗要素等の存在に着目し、それはどこから発生してくるのか、その克服には何が必要で、的確な補修をするためには何が欠けているのかについて省察し、システムや人の背後にある問題点を

第2章 高速道路構造物マネジメントの実践における課題と方策

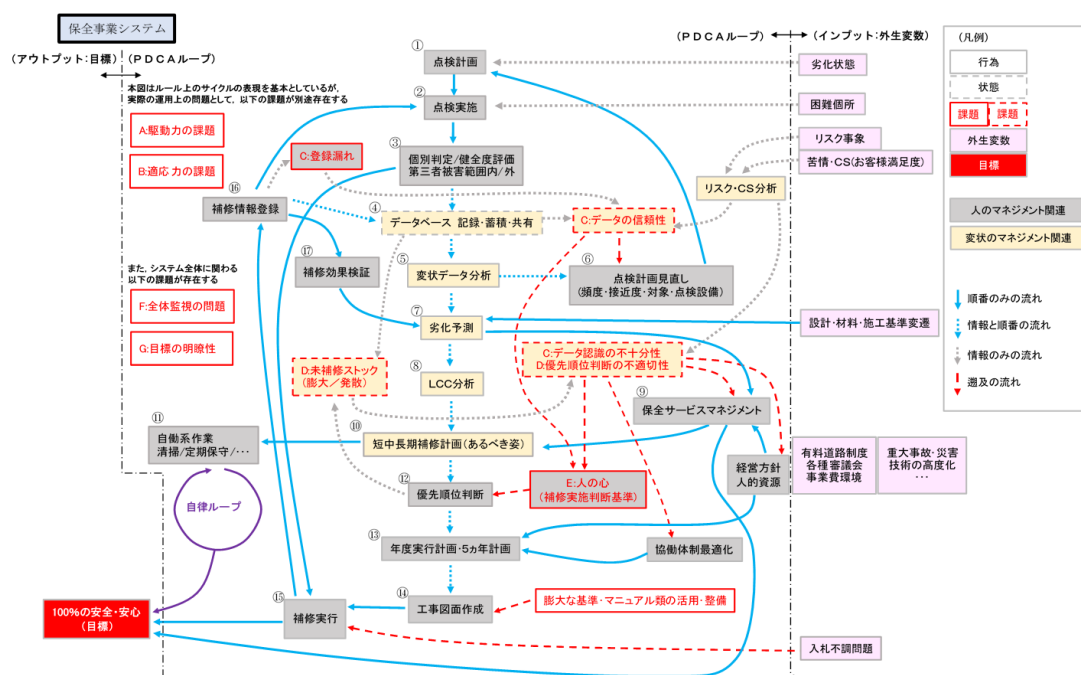


図-2.7 保全事業システムの構造図

明確化する。結果を列挙すると、以下ようになる。なお、以下に列挙する内容は、図-2.5において対応済の内容と重複する部分もあるが、課題全般を網羅的に整理するために重複を許容している。

まず第一に、システムは理念やルールや枠組みだけでは完全には機能せず、運用面において駆動力の存在が重要となるため、この駆動力や推進力に関する課題を列挙すると (図-2.7における課題Aの関連)、

1. サイクルを回すために必要な組織的技術力

: サイクルが動くにはルールがまず重要であるが、必ずしもそれだけでは十分ではなく、抵抗要因に打ち勝つための運用段階における駆動力や推進力といった力が必要になる。サイクルは、資産が置かれている状況の変化がトリガーとなって動き出し、自明のものとしては補修時期の目安を設定している判定・評価や、何らかの対応を余儀なくされるリスク事象等がこれに該当す

る。これを補完し、的確な補修に繋げるためには、さらに組織的技術力とでも呼ぶべき力（流れを止めない力、正しいベクトルとする力、最短経路で進行させる力、情報に幅と膨らみと深みを与える力（普通に言うところの技術力であるが、組織底辺に属するもので技術力の底上げのような意味合い）、組織的向上心（個々人ではない、組織進化の仕組み）、被害想像力・危険察知能力、ループ全体を見通す力、サイクルを定常状態として持続させる力等で構成される）を有している必要がある。

2. 従来と異なる維持管理手法の採用

：事業全体の中のかなりの部分がこの大きなループに乗って事業が進んでおり（清掃・道守等の自律系業務や交通安全対策・耐震補強等の施策的業務が例外）、簡単な保守作業レベルで済ませられる部分は「定期保守」や「経過更新」（点検を逐一介在させずに変状発生を前提として定期的に補修行為や部品交換等を行う管理手法）」で対応した方が複雑なシステム構造の弊害を受け難く安心感も高い。また、これと対極に位置付けられるのが大規模更新等事業であり、前述したように、そこに至るまでの対応さえ間違わなければ、非常に効率的な維持管理手法となり得る。

次に、システムは継続的改善が図られるよう仕組まれていることが必要となるため、システムを変化させるべき際の適応力に関する事項を挙げると（同Bの関連）、

3. 全般的な変化への適応力

：サイクルが回るといのは資産が置かれている状態変化情報の伝達であり、そのインパクトの大きさによっては従前の手法の踏襲では不合理となる場合もあり得、こうした大きな変化への適応力や柔軟性を組織として有することが前提として必要であり、これが保全事業システム構築の本質的問題で

あると言える。

4. 適応における時間効果

：補修工事でも点検でも，従来よりルーティンワークとして行われてきているため，どうしても前例主義（無思慮の要領遵守など）等に陥りがちで，状況（点検・リスク・CS・社会情勢…）の変化に応じて計画や行動指針を見直す習慣あるいは変化への対応力が保全の現場においてはまだ十二分には培われていない。大きな組織になればなるほど，ルールや意識変化の末端までの徹底は徐々にしか進まず，仕組み・制度としては問題解決ができていても，実運用上の効果の発現までには時間を要する場合もあり得る点に留意が必要である。したがって，課題があっても直ちに制度面での問題とは考えず，制度を無闇・頻繁に変更することは避ける必要がある。

次に，システムが適正に回るためにはデータの信頼性が前提事項としてまず必要であり，その上でデータを適切に網羅的に認識していることが結果の適正性に不可欠となるため，これらに関する課題について述べると（同Cの関連），

5. 変状データの意味とシステム内での必要特性

：ループを回っているのは基本的には点検で得られた変状データに関する情報だけであり，流れ方を変える作用としてマネジメント各階層からの介入（リスク等の問題事象・経営方針・外部圧力等）があるだけである。さらに，点検データに，短期計画用/長期計画用，現場用/経営者用等の区分はなく，かつ情報の存在形態としてはデータベースに存在する一種類しか存在しない。これを踏まえると，ループ全体を唯一回る存在として，点検情報に必要とされる要件としては，情報が現場状態を的確に写し撮っているという網羅性・正確性ととともに，誰もがアクセスできる一元性が必要となり，さらに

情報がループ内を流れた痕跡や時点時点でどの位置にあるのかが容易に把握できるようなツール（データベース）を整備しておく必要がある。

6. データ特性の理解と全体データ適正化の必要性

：点検間隔の特性から、情報は散発的・断片的な事実として発生し、よって一括更新情報ではなく常にその一部が断続的に更新されて行く情報として発生する。そのため、獲得され補修に向けて加工され始めた情報は同時に常にその一部が陳腐化し始める特性を持ち、かつ異動により在任期間中に全ての情報にリアルタイムで接する人はまずいないため、必ず幾許かの情報が置き去りにされてしまうこととなる。一方で、安全・安心・快適を最大に向上させ、優先順位が明確で、劣化機構に適合する技術的な満足度を持ち、LCC最適な、施工計画・施工図面に昇華させて行くことが各結節要素の業務となるため、この断続的一部更新情報を統合・加工し続け、常時適切なものに維持し続けて行くことが必要となる。ただし、非常に労力を要する作業となり、専属的な組織を要すると考えられる。

7. 「知らないでいることができない」状況構築の必要性（負の時間効果）

：ループが1周するのに、数ヶ月～長いものなら十年以上の時間を要するために、緊急性の高い情報の処理を優先するのは当然で仕方がないが、そのために緊急性の低い情報の流れが停止してしまったり、情報の中身が変質してしまう（危機感・切迫感の希薄化、忘却・失念、重要情報の削ぎ落ち、内容詳細の不明瞭化等の）可能性が高くなる。人は本能的に嫌な事・不安な事は忘れようとする力が働き、多忙な業務の中、暫時何のリスクも起きなければ大丈夫だと思い込んでしまう習性が現実にはあるので、個人の能力・資質には過度に期待せず、最初感じた切迫感・臨場感や変状の全体像を時々想起さ

せること（「知らないでいることができない状況」の構築）も、人が業務をやっている限りは必要な業務上の手続き要素となる。

8. 累積変状数に起因する弊害

：ある時間断面で見ると、それぞれの部署において、かつループ上の全ての領域において、膨大な数（1事務所当たり数万個所の未補修変状数）の情報・業務が動いているので、どこかに意識が集中するとどこかが疎かになってしまいう危険性を孕んでいる。実際、現在の変状数レベルは人の認識の限界に近いところにおそらくあり、その結果として第1章に示す評価指標の問題の主要原因になっているものと考えられる。保全事業システムは、この複雑なループの中を、1つのデータも漏らすことなく、今日やるべきことを適切に漏れなく選択しながら、全てを補修にまで到達させなければならない。したがって、積極的に数を減らすという行為がなければ、システムはいずれ破綻すると考えるべきである。

次に、膨大な未補修ストックやリスク事象を生む原因となっている、補修優先順位の判断の不適切性を引き起こす要因について考えてみると（同Dの関連）、

9. 異なる補修需要に起因する弊害と必要技術力

：ループが1周するのに、数ヶ月～長いものなら十年以上の時間を要するという幅があるために、最終目的である補修に至らしめるために必要な速度（補修需要）が、情報ごとにその性質に応じて全く異なることになる。すなわち、ループは1事務所当たり数万重の相異なるループから構成されているということの認識が必要となる。したがって、そのことを各結節要素（部署あるいは業務）が斟酌しながらループ内を情報伝達して行くことが必要となるものの、その峻別が恐らく非常に難しいことがリスク等の課題を生んでい

る。補修需要を的確に認識するには技術力や危機察知能力が必要であり、過去 50 年に亘る設計基準・施工基準・使用材料の変遷，初期欠陥の存在，耐久性能・耐荷性能，補修補強工事の耐久性能等における，生まれながらにしての違いに関する組織的な理解と記録が必要となる。加えて，これらの情報は，同じ時間断面内での周知だけでなく，過去 50 年および将来 50～100 年の時間軸上においても綿々と引き継がれて行く必要がある。

10. 優先順位の統一化とベクトルの一体化

：不十分な情報分析，劣化に対する理解・認識の甘さのせいで，未補修ストックが及ぼす悪影響・悪循環，補修行為の新規変状発生に及ぼす予防保全効果などが理解できないままに，結果として変化して行くべき方向性（補修実施判断基準）を明確に指示できないことに起因して，ループの一部分を担うだけの部署においてはグループ全体が目指しているベクトルが揃い辛くなり，組織として調整された活動となり辛くなる。しかしながら，大規模災害時等のグループ全体の足並みの揃った迅速な対応とそれぞれの役割の理解と任務遂行状況を見ると，ベクトルが完全に一致した行動を実行できる素養はグループ全体の中に十分にあると考えられることから，的確な方向性の指示さえあれば克服し得る問題であると考えられる。

次に，システムの運用段階においてルールだけでは十分に回らない問題として，データの信頼性や補修優先順位の判断の不適切性等に深く関係する，人の心に関する抵抗要因を考えると（同 E の関連），

11. 人に関する特性と方策

：保全事業システムは適切に情報伝達を行うための仕組みである。この仕組みを動かすのは人であり，仕組みとして動かされるのもまた人であり，人は

意識がなければ動かない。したがって、ロボットやコンピュータのように指示通りに動く保証のない人の意識と行動がどのような状態にあるのかを知ることが何よりも重要となる。人は意識の変化がなければ行動を変化させることはないものであること、また納得感を伴う意識の変化でなければ永続きはしないことを鑑みれば、組織の改編やルールの充実だけでは真の意味での仕組みは変化せず、また定着しない可能性がある。したがって、ルールやツールという表面的で一過性の整備だけでなく、それらの背景部分、変革が必要な理由を伝え、意識・心の持ち様を変えるための具体的方策にまで言及する形態の仕組みである必要がある。

次に、システムが適正に回っているかどうかを認識するための、全体監視の課題について考えると（同Fの関連）,

12. サイクルの俯瞰的認識・一元管理の必要性

:このループの中のあらゆる部分で、常に膨大な情報量が流れていて、NEXCO各部署および各グループ会社を経由して行くので、全体の流れ（サイクルは適切に動いているのか、変状数は発散して行っていないか、サイクルを阻害する要因はどこにあるのか等）を監視することは容易なことではない。そこで、全ての業務を一元化できれば良いが、それは到底無理な話なので、各業務を専門部署が分担し合うこととなり、結果として全体を把握し得る部署が存在し得ないことになる。したがって、この一元管理の役割を担う部署と客観的・定量的に評価するための評価指標とを明確にする必要がある。

最後に、駆動力があるとしても、システムからの出力レベルを設定しなければどのように駆動して良いかが分からず、また適応力があるとしても、システムが適正に回っているかどうかを判断するためには判断指標も必要となる。この業務目

的としての意味とシステムの健全性の判断指標としての意味を併せ持つ、目標に関する課題を考えると（同Gの関連）、

13. 目標・評価指標の具体化の必要性

：サイクルを回すためのエンジンとして、またサイクルの完結を明確にするためにも、目標の設定は重要である。NEXCO西日本にとって、100%の安全・安心は至上命題・最大目標であるが、かなり抽象的な概念であり、そのことが目標への到達状況の認識の不明瞭さを生み、適正な施策規模の判断を難しくし、いずれは何とかなるとの楽観的観測を生み、目的を見失った結果としての手段の目的化に繋がり、前例主義に陥り、逆に成果の不明瞭さが相応な評価を阻み、モチベーションを低下させるなど、保全事業システムが円滑に機能しない諸問題を生んでいる原因になっているとも考えられる。そこで、安心とはまず管理者が安心することが大前提となることを鑑みれば「変状（資産状態）の常時全貌把握」であり、安全とは「補修期限までの補修完結」である等の目標の噛み砕いた具体化を必要とする。保全事業システムにおいては、個々の課題を掘り下げた上で、細かなアウトカム指標（KPI）を設定し、その達成に向けて施策を実行するために、保全サービスマネジメントのロジックモデルのフレームワークを用いてPDCAサイクルを回すこととしているが、駆動力を欠いているために、ルーティンワークとしての業務の定着を図るためには別途駆動力を与えなければならない。

14. 全社共通認識を育む精神土壌構築の必要性

：安全・安心は補修の部分からしかアウトプットされないことに留意し、全ての事柄の善悪・優劣の判断は、ここに速やかに・的確に到達することに寄与しているか否かで判断すべき（選択と集中）である。しかしながら、全体

が俯瞰的に見えない一部業務だけを実行する部署においては、異なる価値観（本来手段である業務の自己目的化、全体最適でない個別最適の意識の萌芽、リスクよりも経済性を優先する等）が蔓延し易い土壌がある。前述の具体的な目標に対して、これを阻むものを課題として捉え、それぞれの解決を図って行くことが、保全事業システムの確立が意味することとなる。

15. 保全事業システムの最終形・最終目標

：保全事業システムとして絶対的な姿がある訳ではなく、むしろ現場の実情に応じて、また時間の経過を経て、どんどん変わって行くべきものである。適切な姿に柔軟に変えて行くためには、どういう意識と行動に依拠しなければならないか、についての言及も必要となる。保全事業システムとは与えられるものではなく、保全業務に関係する者たち全員の知恵と能力を結集させ、最適な仕組みを作り上げていく目標のようなものであり、この点が保全事業システムの構築という言葉が意味するところのことであることを保全業務関係者に伝える仕組みが必要である。業務とは本来、ルールに従って行うだけの仕事から、ルールを身に付け自律的に行動できるレベルへと進化して行くものである。保全事業システムもある一定のルールの下で自律神経の働きの如く変化に自動的に追従しながら動くことを目指しつつ、最終的には自らの意志と高いモチベーションに基づく自律的な業務実施（自己発生的なシステムの駆動）が、安全・安心と全体最適に自然体で繋って行くという形での継続的改善を理想とすべきものであると言える。

保全事業システム、ひいては一般論としての構造物マネジメントには、上記に列挙したようなシステムや人に由来する根源的な課題の存在が考えられ、それはサイクルの至る所に、いろんな形、いろんな原因で存在していることが理解でき

る。これを人体で例えれば、血液（諸情報搭載）が各臓器（部署/業務）を流れ、相互作用により血液の質が絶えず変化し各臓器も全体最適に向かい変化し続け、これらは多くは自律神経の下で行われるべきであるが、場合によっては中枢神経によるコントロールも必要とし、組織が老化してくれば、血液の質を良くし流れを良くする体質改善が必須となり、最悪の場合は臓器の手術も必要となるようなものと同様に考えることができる。情報量が膨大になり過ぎている現在、血液は非常に流れ辛くなっており、その質が十分なのかどうか、正常に流れているのかどうかさえ疑わしく、組織は自己繁殖し癌化しつつある可能性も考えられるが、これらの状態を正しく掴み切ることすら困難な状態に至っていると言える。保全事業システムの理念は、資産の状態変化（変状）の全貌をまず見えるようにし、変化の情報は正しく生成され、かつ流れているか、情報を各部署が適切に加工し送り出しているか、各部署は情報を正しく読み取り外部環境の変化に適応できているか、情報を分析し加工し、また読み取る力を有しているか、最終的には的確な補修が実行されているか、それは今後長期に持続可能か、などを逐次明確にしながらか、自律的にそれらが実行されることを期待しつつ、自律神経だけでは難しい部分をコントロールし執行体制や制度自体を変革して行こうとしたものである。しかしながら、上述の課題の多くは、構造物マネジメントが適正に動くことを阻害する抵抗要因として作用するため、行動変化を促すことに繋がる、それらを上回る駆動力等を付与する必要性があるものと考えられる。

2.3.5 変状を対象とするマネジメントの必要性

以上に示したような、構造物マネジメントのシステム構造と課題の認識過程を踏まえると、システムの適正性を担保するには、課題そのものをあぶり出し、切迫感を与え、また課題を克服するための示唆を与えてくれるものとして、全ての

課題の表出結果とも言える変状（補修）データに基づく課題分析と方針策定が非常に重要な位置を占めるのではないかと考えられる。すなわち、構造物マネジメントを効率的・合理的に動かすためには、ルールや枠組みの面において図-2.5で措置した性善説に基づく内容や理念だけでは完全な解決が困難な部分が依然残されており、それは変状（補修）データから導き出される技術的な課題であると考えられ、上述の整理に従えば、1. 5. 8. 9. 10. 11. がそれに該当すると考えられる。構造物マネジメントの本質は、補修完結までの変状データの業務間・組織間の移動であり、また施工図面に昇華させるまでのデータの統合・分類・加工であり、さらに変状発生に対し補修行為を優位に持つていくことのせめぎ合いである。このことを考えれば、的確な補修実行という大命題に対し、現状どのようなリスクを抱えているのかについて変状データと補修データが意味していることを、データそのものの中から如何に的確に読み解き、かつ読み解いたものをどれだけ正確に・真摯に理解するか、が鍵を握るものと考えられる。さらに、データが必要と語る、必要な時期に・必要な規模で・必要な工法によって補修を行うという詳細な部分に関しても、現実のデータから探り出し、それを素直に受け入れる以外に術はないものと考えられる。以上のような事項が変状を対象とするマネジメントの必要性の意味するところであるが、簡略に言い換えれば、「変状発生と補修行為の間の内部連関構造を理解する」という点に尽きる内容となると考えられる。これをさらに言い換えれば、何故補修しようとするのか/何故補修しようとしなのか（補修行動原理とでも呼ぶべきもの）、物理現象としての劣化と人為の領域としての補修行為との間の複雑な連関構造を定量的に解明することに他ならない。構造物マネジメントの現場では、管理者の意に反して、構造物が勝手に劣化して行くから困るとの思いや、概ねの予測はできても適切な行動には繋がらない現実（人の心）が随所に感じられる。しかし、構造物は人が創った物であり、人の意思

に従った姿で存在しているだけであるので、コントロールできて当然だと思われるけれども、できてはいない。この事実、構造物側の問題ではなくて、全ては人の側に属する問題だと捉えない限り、正しい構造物マネジメントの構築はできないのではないか、と考えるべき重要な事項であると言える。しかしながら、現実、そうした状況から抜け出すための具体的手段の発見や提示が難しいことが問題の根底にあるものと考えられる。したがって、全ては変状（補修）データを読み解き、変状は何に起因して発生しているのか、将来どのように推移する可能性があるのか、単なる不具合個所の機能回復という意味だけでの補修ではなく、変状発生をコントロールする付加価値を有する能動的な補修等に関しての、実データに基づく定量的・客観的で切迫感を伴う理解を管理者に促すことが何よりも必要なことであると考えられる。そして、変状のコントロール可能性の確信の下で、管理者に正しい危機感・期待・展望を抱かせ、意思決定が適切になされるように支援・誘導する（構造物マネジメントの駆動力を与える）ことが、適正な構造物マネジメントの運用面において残された最も大きな課題として存在しているものと考えられる。2.2で示した、相手を正確にまず知った上で、それに基づき人為の側の問題として、人の行動（補修行為）を律する方策を考えることの意味合いがここにあるが、次節ではさらに人為の側の問題を整理することとする。

2.3.6 人の限定合理性に起因する課題

1.1でも若干述べたが、構造物マネジメントを考えるに当たっては、人為の領域の特性やハイコンテクスト社会としての特性への配慮を抜きにしては語れない。人為の領域の特性を分析する場合、いわゆる土木技術的な分野での研究実績よりも、災害心理学³⁾や行動経済学・経済心理学等におけるバイアス^{4),5)}や、経済学の取引費用⁶⁾といった不確実性下における人間心理・組織行動の合理性に関する

分析が大いに参考にできる。これらの文脈においては、「合理的」「自制的」「利己的・利他的」「利用可能な情報」「最適化コスト」「ヒューリスティックス」「認知不協和」「近視眼的損失回避性」「現状バイアス」等の単語で表現される事項が重要な要素を占めており、そのような限定合理的な人の特質の存在が、市場を狂わせたり、市場の構造変化を迫る等の大きなインパクトを持つという問題が指摘されている。これと同様な事象が、構造物マネジメントの現場においても生じている可能性がある。マネジメントの分野に現れる心理あるいは組織内行動原理としては実に数多くのものが考えられ、人の限定合理性が現実の変状（補修）データに見える形で表出しているものもあれば、組織内部にいて初めて認識可能なものもあり、土木的な用語を用いて表現すれば、以下のように列挙できる。ただし、以下に述べる分析は、人間心理の自然な性向を単純に表現しているだけであり、価値判断についてはこれだけで判断できるものではない。しかしながら、仮にこうした性向が望ましくない結果に繋がっているのだとすれば、改善が図られるように対応を検討する対象として考えなければならないために、細部に亘っての考察を加えようとするものである。すなわち、人は不完全であることを前提に置いて、不足する部分を如何にカバーすべきなのかの視点から議論を深めることが重要となると考えられる。また、行動経済学や心理学では、実際の間人を対象とした検証や実験に基づいて、「限定合理性」を万人にあてはまる、共通的な、どこにもある、人間として避け難い、あらゆる側面において存在するものとされており、人間の合理性にある程度の限界が生じることは当然のことと考えられている。したがって、以下に示す心理傾向も決してNEXCO西日本特有の事柄を言っている訳ではないことに留意してほしい。

まず、変化への適応力の視点からの限定合理性（抵抗要素）を考えると、

1. 前例主義

: 経済学における習慣形成仮説と同様な「現状維持バイアス」的な要素である。保全業務の多くは毎年の繰り返し作業であるため、前年同様に、と指示するだけで業務が概ね成立してしまう傾向があり、特に短期間で異動を繰り返す立場の者にとっては改善すべき点も理解できないままに従前と同じことを繰り返すことになる。老朽化が顕著でなかった以前は通用したとしても、劣化のステージが1段階上がったと考えられる現状においては全ての状況で通用するとは限らない。

2. 経験則

: 保全業務の多くは専門従事者の暗黙知が占める領域が広く、かつ益々高度な専門性が必要となってきたため、専門外は口出しできる余地が少ないことに起因する、暗黙知に頼ってしまう状況。あるいは、経験則が優位で絶対だと思ってしまう心理。心理学によれば、多くの人が自信過剰の習癖があり、自分の判断を他者よりも、あるいは現実以上に正確であると思込むとのことである。

3. 成功体験

: 構造物の劣化は時間スパンが長いので、不作為の結果が顕在化するまでには長期間を要する。一方で人はそれより短い間隔で異動してしまうために、不作為等の結末を見る機会が極めて少なくなり、結果として自らの過去の行動の問題点に気付くことがなく、その後の部署・業務においても同じことを繰り返してしまう。あるいは、気付いたとしても、認知不協和の意識が作用し、自分の誤りによるものではないと結論付けてしまい、結果として反省には至らない心理傾向。また、経済学でいう「心の家計簿」的な、過去の行動が頭の中でどう認識されるかの問題もあり、自分の中での「頑張った感」が

あれば、次の行動レベルは相対的に低くなるような内容も含まれる。

4. 正常性バイアス

：災害心理学や行動経済学と同様の意味であるが、常に平穏を願っている心の中では、著しい変状を目の当たりにしても、まだ大丈夫と思いがちな心理傾向。また、個人としては問題だと感じてても周囲が同調的な行動を起こさなければ、まだ大丈夫なんだと考え直し多数に従ってしまう心理傾向。平成30年西日本豪雨における避難しない心理と同様であり、より切実に訴えかける臨場感や切迫感を持つ、すなわち実データに基づく反駁困難な情報である必要がある。

5. 諦め感

：従来の補修実績・年間補修能力から判断すると、加えて今後も加速度的に変状発生は増え続けて行くと思いつているせいで、どうやっても発散傾向を収束させることは難しいと深層心理では思っており、前向きな姿勢になれないでいる状況。また思うように動いてくれない配下の者に対する諦め感も存在すると考えられる。

次に、主として補修遅延を引き起こしてしまうことに関する限定合理性については、

6. 先送りの心理（近視眼性・時間非整合性）

：人は物事の評価を長期よりもむしろ短いインターバルで評価しがちであり、長期的視野が必要な予防保全という補修方針は、予防保全をした方が良く、すべきだと理解できてはいても、直近の評価を優先してしまうことに繋がる。異なる時点間を通じた選択において自制的になり得るか否か、という心理で、いわゆる「先送り」等をしてしまう避け難い心理傾向。これを克服す

る一つの方法はコミットメントや強制性であるが、後述する「叱られない」点や老朽化への対応は強制性が難しい点に起因して、容易に反故にされてしまうことになる。したがって、将来も結局逸脱してしまう事までを織り込んで、現在の意思決定を行うことが必要となるが、このような「洗練された」意思決定ができる者は極めて少数であるのが現実である。

7. 狼少年的意識

：変状がたとえばA1（概ね2年以内の補修を要す判定区分）と判定されても、リスク管理上のカバー率と空振り率のトレードオフの関係性から、前回点検時以降の力の作用や周辺環境等がさほど過酷な状況にならなかった場合には2年経過後も問題化しないことが多く、その積み重ねの効果により、全ての変状が問題化することはないと予断を持ってしまう心理傾向。

8. 変状慣れ

：劣化がかなり進行してしまっている現状においては、かなり酷い変状を見る機会が多く、それを危機的状況にあると感じる閾値が徐々に上がって来ている状況。特に若手技術者にとっては、著しい変状のある姿が当然の姿となってしまう。

9. 永久構造物としての幻想

：単なる希望的観測の場合と、もう1つは構造物の寿命が超長期であることに対して自らの担当期間が非常に短く、今やらなくても大勢に影響はない、長期的には悲観的であっても自分の担当期間においては楽観的である、というような意識の作用。学校教育において、構造や材料の原理や利点については教わるものの、同時に劣化や欠点を同等レベルでは教わってきていない点にも原因がある可能性がある。実際、数十年前にはコンクリート構造物はメ

メンテナンスフリーと言われていた時代もあり、そのような誤ったイメージを今もなお深層心理に抱えている可能性がある。

10. 不確実性の下での行動指針

：構造物の維持管理には予防・事後・観察等の保全手法があるように、唯一の管理手法に限定できるものではない。特に構造物の老朽化は不確実性が支配しているものであることから、唯一これしかないという行動指針を示すことが難しく、このことに起因して様々な考え方・言い訳が通用してしまう。また、確率分布を持つ不確実性ではなく、多くの場合、実務者レベルでは確率分布自体が定量的に認識できていないため、あらゆる判断・行動が可能になってしまうことになる。

11. 経済性優先

：個々の変状に対して逐一補修する場合、多くのケースで不経済となる。独立した変状、あるいはリスク化するまでの何らかの対処が担保されていれば、許容され得る合理的な考え方ではある。しかしながら、ほとんどの場合、経過観察を続けることによる事象拡大後のライフサイクルコストまでを考慮した経済性までは意識していないため、負の側面の方が大きい。また、この経済性には、完全最適化による便益と最適化のために要する費用とのトレードオフの関係性が含まれることもあり得る。すなわち、変状全貌把握には多大な労力が掛かるので、ある程度の認識レベルのままで意思決定をしよう、ということになり、これらの意識が未補修変状数の発散傾向やリスク事象を生むことに繋がっている可能性がある。

12. 忘却・失念

: 多くの場合、未補修変状数が膨大すぎることに起因して、完全網羅的に全変状に対して意識を働かせることができないでいる状況の下での無意識の作用である。データベース上には記録が完備されているので、「知らないでいることができない状況」を作り出すことで解決できる問題であるが、可能であることとできることとは別次元という問題が依然として残る。

13. 取引費用

: 経済学における、契約行為や意思決定をする際に、情報収集等の限界や非効率性や不確実性に起因して、効率的な業務執行を妨げる阻害要因として作用し、また全体的な業務構造を変えざるを得なくなるように作用するコストが存在する、という概念であり、構造物マネジメントにおいては図-2.7に示したような複雑な構造が、取引費用を高める要因となっている。そのため、グループ内の内部取引で処理できる場合には、意識の同調性とも相俟ってコストは低く抑えられ、逆にグループ外へ外注する場合には高くなる傾向があり、そうした差異が業務実施方針の選択に、またその費用の高さ（業務遂行上の手間ひま）が補修実行判断を遅らせる方向で抑制的に作用している。また、業務構造を変えなければならないという点が、構造物マネジメントの構築に相当するものであると考えられる。一つの解決方策としては、契約手続きの簡素化やグループ執行体制の強化・拡張があるが、より重要な点は契約等よりも時間的に先行する意思決定の迅速さと適切性を支援する方策を講じることであろうと考えられる。

最後に、逆の視点から、構造物マネジメントの適正化に寄与する可能性のある人の心理の特質については、

14. 予防保全の素養（相互応酬的動機・平等志向）

: 簡単には「目には目を，歯には歯を」の行動原理であるが，経済学においては人には利他的な要素の存在が多分にあり（ただし，さほど持続的ではないとされている），また，そうした行動には手続きやマナーが影響を与えていることが観察されている．構造物マネジメントでは予防保全的な行動がこれに該当するが，一般的にその重要性は理解されており，こうした性向が支配的になれば，それが行動に移されることも十分期待できる．ただし，ここに列挙している他の要素がおそらく優勢に作用して，その実現を難しくしているものと考えられる．これを優勢なものに位置付けるには他の要素の影響度を低下させること，また持続性を担保するには競争環境下に置く（周りの目を気にさせる），あるいは満足感等のインセンティブ付与手段が必要になるものと考えられる．

15. 納得感醸成の素地（曖昧性の回避）

: 不確実性の下では，人はより確実性の高い方を選択する傾向があり，曖昧性を排除しようとする．構造物マネジメントも相当に不確実性の高い領域の問題であるために，人は皆不安を感じていて，客観的な確実性を求めているものと考えられる．したがって，このような性向から考えれば，定量的な分析結果や確率分布を受け入れようとする素地が，不確実性が支配する構造物マネジメントにはあるのではないかと考えられる．

以上に示したような，上記のうちいずれかの心理，理由付け，あるいは言い訳が，現場の実務者達の中に働いているのは間違いのないところであり，望ましくない方向での相乗効果も働いているように感じられる．さらに，こうした心の動きをさらに助長する制度的な要因との相互作用も考えられ，以下のような要因が考えられる．

1. 業務従事期間と情報獲得期間との時間的ずれ

: 短期的異動のせいで、補修においては時間軸上での責任転嫁に、点検情報取得においては在任期間中に全ての情報にリアルタイムで接する人はまずいないため、必ず幾許かの情報が置き去りにされてしまう問題に繋がる。これが助長原因の一つであることも組織として認識はできているが、長期化による逆の弊害等の様々な障害要因、また責任の多くは既に過去にあるとの意識も働き、赴任期間の長期化には進みにくい一面がある。

2. 劣化と業務従事期間との時間スケールの相対差

: また、構造物の寿命が超長期である一方で、問題化しない限り不作為が叱られることはないため、問題として露見するまでは不作為が正当化されてしまうことになる。すなわち、変状のマネジメントの具体方策が存在しない場合には、不作為を容認せざるを得なくなる。

3. リスク発生確率の低さに起因する助長要因

: 保全の現場では、逆に、何も起こらないことが当然とされ、何かあった時にだけ評価が下がることになるが、リスク的事象の発生確率は相当程度に低いいため、業務従事期間中頑張っても頑張らなくても同様に何も起こらないとすれば、楽な方を選択してしまいがちにもなる。

4. 自主裁量・個別意思決定に関する助長要因

: さらに、強制的に統一的な施策が実行可能な交通安全対策等の施策的事業とは異なり、劣化に対する補修は、変状情報に基づいて対策内容を構造物・変状内容に応じて個別に決めざるを得ないことや変状データに対する組織レベルに応じた情報認識度合いの格差等があるために、どうしても現場におけ

保全事業費5カ年総額(百万円)

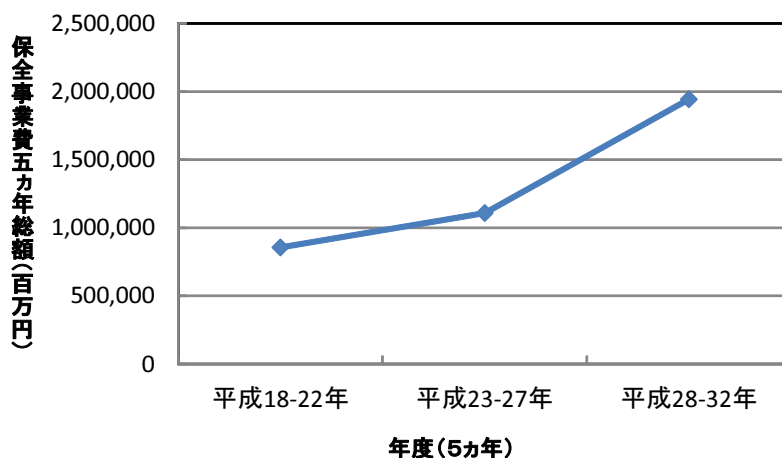


図 - 2.8 保全事業費の推移

る自主裁量，個別の技術的判断・意思決定の余地が必要となり，完全に強制的に実行させるのは業務の質的要素から難しい側面がある。

ここで，NEXCO 西日本が服している有料道路制度の現状に簡単に触れておく。高速道路の維持補修の事業費は，高速道路の通行料金と高速道路債務（資産）の償還（減価償却）制度に大きく依存する形で，高速道路保有・債務返済機構との間の協定や国土交通省からの事業許可において定められている。その概略的な推移は，図-2.8 に示すように，総額で見ると，民営化当初（平成14年度に比して3割カットの水準）に比較して2倍を超える事業費が現在では確保されているところであり，かつこの中には固定的な費用も2割程度は含まれているため，少なくとも近年では事業費の制約はクリティカルな要素ではなくなっていると考えて良い状況にある。また，民営化以降，維持補修の実施結果である財務決算上，黒字（事業費を使い切れていない状態）が優勢な情勢にあり，その結果として内部留保（利益剰余金）も潤沢な状況で，真に必要な事業は実施可能な状況にある。

以上に示したような状況下で，様々な意識に支配されながら，膨大な数の人達

が現場業務に従事している。各人がどういった意識を持っているかを特定する術はないが（負の側面であるので、アンケート等を取ったとしても素直で正直な回答は得られない）、柔軟性よりも硬直性がより強い状態で、各人が上記のいずれかの心理状態に陥っているものと推察される。特定する術がないということは、逆に考えれば、考えられるあらゆる心理の可能性を考えた上で、人のマネジメントは検討されなければならないとも言える。一方で、現場の実務者たちも当然のことながら危機感を抱いており、問題はその危機感が正しい事実認識に立脚した正しい危機感となっているかどうかにあると言える。人は自分の行動や判断について、日常的に正当化（言い訳を）しながら日々を過ごしている。したがって、業務に限ってはその行為内容を正当化するなどと言っても無理な相談であり、ここに人の心の問題の難しさがあり、これが構造物マネジメントにおける人の限定合理性と変状のマネジメントの必要性に繋がっているものと考えられる。

2.4 課題解決に向けての改善方策

2.3.4 および 2.3.6 では、構造物マネジメントのあるべき構造を踏まえて、人とシステムの背後にある問題をルール面と運用面に分けて抽出し、変状発生と補修行為の間の内部関連構造を理解すること等の必要性について整理した。構造物劣化は、物理現象としての領域と人為の領域との双方に跨って進行する。そこで、**図-2.7**の模式化に際しては、人のマネジメントに係る要素と変状のマネジメントに係る要素の区分も併せて行っている。これから分かるように、システム全体としては、人のマネジメントの中心部分に変状のマネジメントが入り込む形でシステムが構成されており、相互に密接不可分な関係性にあることが理解できる。また、同図において、状態要素から認識できる課題要素がフィードバックされて次の行為に遡及することを通じて改善されて行く流れがある一方で、先述した人の

心の問題の具体的な態様を勘案すると、課題が新たな別の課題を生んでいる流れの存在も想定できる。したがって、変状のマネジメントが不適切あるいは不明確なままでは、その後の行為内容や出力結果の適正性が損なわれることとなり、それが補修優先順位の判断の誤り（人の限定合理性）を増大させることに繋がり、リスク事象や未補修変状の増加傾向等の問題を生むことに繋がっていることが想定される。すなわち、劣化に対する理解・認識の甘さや切迫感の欠如や言い訳が今日の状況を生んだ主原因であり、自らが引き起こした問題であることを管理者は認識する必要がある。以上のような構造物マネジメントの模式構造から導かれる帰結として、人の心の部分の問題を克服し変状を適時・的確な補修に繋げるためには、人の限定合理性が外的に見える形で表出している現実の変状（補修）データを用いた分析に基づき、変状発生と補修行為の間の内部関連構造を探り出し、定量的・客観的根拠を持って、例えば変状数を定常状態として持続的に維持させられる方策（変状数定常化サイクル）等を明確化することの必要性・重要性が浮かび上がってくる。すなわち、今日これをやればそれは防げる、まだ諦めるべき状況にはない、というような具体事例を示すことによって、現場の人達に「今日やるべきこと（皆が向かうべきベクトル）」を明示し、納得感を持って理解させ、同時に、正しい危機感と期待と展望のもとで「今日やる」という強い意志（構造物マネジメントにおける駆動力）を与え、前向きな姿勢で変状発生をコントロールして行こうとの意識に変えていくことが必要となる。

これらのことを図式的に表現すると、**図-2.9**に示すような模式図が得られる。本図が意味することの詳細な説明は**第3章**に譲ることとするが、構造物マネジメントを適切なものとするためには、人のマネジメント（「今日やる」の部分）と変状のマネジメント（「今日やるべきこと」の部分）の2つの大きなマネジメントの存在と必要性を認識した上で、それぞれのマネジメントの実態と課題を分析

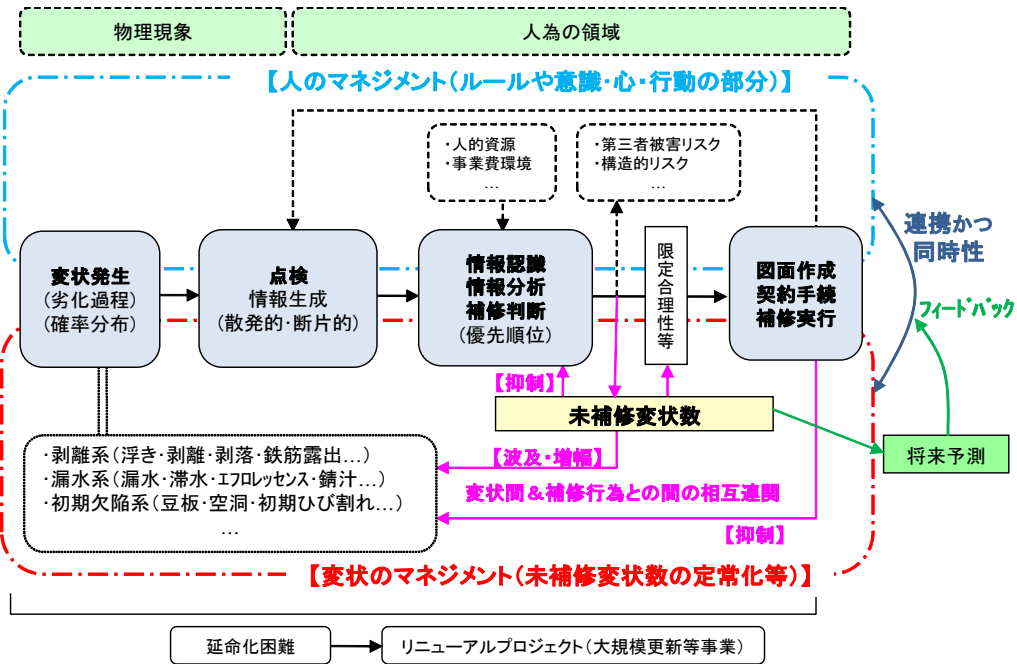


図 - 2.9 構造物マネジメントの概要 (変状のマネジメントの必要性)

し評価指標に基づき対応を検討するとともに、双方を連携させながら、できれば同時解決を図る形で、また未来からのフィードバックも含め、構造物マネジメント全体の適正性確保と継続的改善を図って行くことの重要性・必要性を本図は意味している。なお、この定常化は、一刻も早い定常化であり、また定常状態のレベルをどの位置で保つべきかについてはリスク管理と顧客満足度の問題として決定され、評価指標に基づいて表現されるものである。本図に示す、変状のマネジメントの具体の姿については、本論文の第3章から第5章において、様々な側面から検討・分析を加えることとする。さらに、以降の各章で展開する技術的方策だけでなく、改善方策の一つとして次の事項の重要性も考えられる。すなわち、保全事業システムの最終形としては、自律的に駆動するシステムが永続的に機能することを目指すものであるが、人の心理面に大きな課題が存在すると想定される現状を鑑みれば、そこに至るまでの過程においては、本論文等から得られた知

見や方針を，当面は強制的な制度と施策の実行に依存しながら（この点について，NEXCO 西日本においては，部分的な分野ではあるが「保全事業システム推進五箇年計画」という具体の施策を策定し実行中である），徐々に自律的な行動の定着を図っていくスキームとすることもまた不可欠であろうと考えられる。

2.5 結言

本章では，高速道路における構造物マネジメントの主としてルール上の制度設計の具体と，結果としての未補修変状数の増大やリスク事象の発生に見られる問題点を踏まえ，構造物マネジメントのあるべき構造の模式化と実運用上の検証を通じて，システムの背後にある根源的課題と，生来的な問題として様々な態様で保全の現場に広く存在する人の限定合理性に関わる問題点の存在を提起した。さらに，構造物マネジメントのサイクル上で，人のマネジメントと変状のマネジメントは相互に入り組んだ形で存在しており，構造物マネジメントの課題を解決する手段としては，両者の相互作用を踏まえ課題解決を図ることの重要性を指摘した。具体には，人のマネジメントはISO5500x等の手法を用いたルール化を図ることで概略的な解決が図れるものの，その運用に際しては人の限定合理性とも言える問題が横たわっており，そのためにこの特質を踏まえた上で人のマネジメントの具体的改善を図ることが必要となる。より詳細には，人のマネジメントを適正化するためには，人の限定合理性と深く関係する現実の変状・補修データに基づいて，人為の領域を含んだ形で分析を行い，変状のマネジメント（変状数定常化サイクルの構築等）に関する課題を解決するための具体の方策を客観的・定量的に明示した上で，同時に，正しい危機感・期待・展望や納得感に基づく強い意志を管理者に与え，適正な意思決定を導くという方法論に依ることの重要性を指摘した。以上のような分析・考察を踏まえれば，変状のマネジメント（変状数定

常化サイクル等)は、人為の領域(具体には補修行為)を含んだ形で分析がなされるべきであり、人のマネジメントは人の心の問題を深く考慮した上で、変状のマネジメントの結果に基づきルール化等の改善がなされるべきである。その意味においては未だ未確立の学問領域であるとも言え、本論文の以降の各章において、人為の領域を含んだ形で分析を加え、合理的な構造物マネジメントを確立するための一つの方法論を提示したいと考える。また、本章において、ここまでに述べたような制度設計の考え方・結果に対する考察・マネジメントシステムのあるべき構造の定式化・課題抽出の方法・人の限定合理性と解決方策の導出までの考え方等における個々の手法に関しても、一般論として、インフラ管理の現場に大いに参考とできる知見を与えるものであらうと考える。

参考文献

- 1) 小林潔司：土木工学における実践的研究：課題と方法，土木技術者実践論文集，Vol.1, pp.143-155, 2010.
- 2) Diestel, R., 根上生也，太田克弘：グラフ理論，丸善出版，2012
- 3) 広瀬弘忠：人はなぜ逃げおくれるのか，災害の心理学，集英社，2004.
- 4) 友野典男：行動経済学—経済は「感情」で動いている—，光文社，2006.
- 5) 多田洋介：行動経済学入門，日本経済新聞出版社，2014.
- 6) 三上真寛：取引費用経済学の再検討—ウィリアムソンとコースの比較から—，進化経済学論集 14, pp.997-1013, 2010.

第3章 変状の発見過程及び変状と補修行為との間の相互作用

3.1 緒言

第2章における構造物マネジメントに関する包括的な分析結果を受けて、本章においては、物理現象としての変状発生過程に人為行為としての補修行為を含めたマネジメント空間に存在する相互作用である、変状発生と補修行為と累積変状数の3つの間の相互連関構造、すなわち、変状間の波及・増幅効果、補修による新規変状発生抑制効果、累積未補修変状が補修行為に及ぼす負の効果（悪循環）、および変状発生のコントロール可能性について分析を加え、人のマネジメントを適切に行う前提として必須となる構造物劣化についての本質的理解（発生と影響）と、それを踏まえた構造物マネジメントの方策を考えるための方法論を提示する。より具体的に考えると、高速道路において未補修変状数が経年的に増加している理由として、1) 変状の多様性と発生過程の複雑性に関わる要因と、2) 現場における構造物マネジメントに起因する要因とが考えられる。前者の影響を分析するためには、変状発生の時間的発生分布の特性、変状相互間の波及・増幅関係の存在について分析する必要がある。後者に関しては、補修行為が新たな変状発生に及ぼす影響や、補修行為の実施判断におけるマネジメント上の課題について分析する必要がある。それらを踏まえて、道路管理者が長期的な変状発生過程を抑制し得る可能性と、未補修変状数を可能な限り低い水準に維持することの重要性等のマネジメント体制を確立するための課題について考察する。

高速道路構造物は、主としてコンクリートと鋼材により構成されている。構造

物が置かれた環境や外力作用に起因して種々の変状が発生する。構造物に発生する変状は物理現象・自然現象のみに起因するものではない。そもそも道路構造物は人間により構築されたものであり、建設された時点ですでに人為の影響を受けているとも言える。したがって、初期条件を踏まえた補修行為を適切に施すことで、変状発生はコントロールできないはずがないと考えられる。高速道路構造物の維持補修を的確に行うためには、構造物や変状の特性を過去および将来に亘って知ることが必要となる。時間の経過に従って、構造物の年齢は確実に増加する。一般に、構造物の年齢が増加すれば変状が発生する確率が増加することが想定されるが、将来時点における構造物の変状発生率に関する情報は十分ではなく、今後の変状の発生状態を予測することは非常に難しい。しかし、高速道路の管理主体が管理する構造物のストック量は有限であり、構造物全体に亘って必ずしも変状が無限に増加していくわけではない。このような状況を考慮すれば、高速道路において長期的に観測される変状発生の生起分布に対する認識が必要になると考える。さらに、構造物の劣化は全てが単独、偶発的に発生しているわけではなく、変状間に因果関係が存在する場合や補修行為がその後の変状の進展や新規の変状発生に影響を及ぼしている場合もある。

一方、維持補修の現場においては、過去の点検において発見された変状が未補修のまま経過観察されている場合も少なくない。実際に、NEXCO 西日本が管理するある高速道路区間においては、**図-1.1**に示すように未補修変状数が増加している。このような未補修変状の存在が、新たな変状発生の原因となる場合もある。未補修変状数の増加は、補修行為の実績が新規の変状発生量に追い付かないことを意味している。高速道路の管理主体は、組織内の人員体制等の種々の制約条件の中で、点検行為を通じて認識された変状に対して補修計画を立案し、補修行為を実施している。にもかかわらず、未補修変状数が増加していく背景には、組織

的・制度的なマネジメント体制，あるいは補修行為に携わる技術者に関わる問題が介在している可能性も否定できない。

以上の問題意識のもとに，本章では高速道路上において未補修変状数が増加している現状に対して，2つの側面から分析を試みる．1つは，高速道路インフラの点検において発生した変状の抑制とその経年的発生特性を分析する．いま1つは，経年的に発生した変状に対して実施された補修行為実績データに基づいて，未補修変状数が増加する原因について分析する．このような分析を通じて，実際の現場において発生する未補修変状数の増加という悩ましい問題の発生根源はどこにあるのか，今後どのように対処していけば補修は円滑に進むのかについての有用な知見を得たいと考える．

3.2 本章の基本的な考え方

3.2.1 既往研究の課題

劣化過程に関しては多くの研究成果がある．これらの既往研究では，たとえばコンクリート標準示方書⁶⁾に代表されるように，劣化・変状ごとに平均的な劣化過程として記述される場合が多い．一方，現実の構造物においては，初期施工の品質や材料特性や強度のバラつき等を反映し，同一条件下におかれている部材や部位であっても劣化過程が異なる．そのため，現場での観測データを用いて劣化予測モデルを統計的に推計する手法も開発されている^{7),8)}．いずれの手法も，構造物を部材・部位等の個別単位の集合体として把握するとともに，それぞれの単位における劣化の進展の程度を幾つかの劣化グレードに区分し，そのグレード間における質的な推移状態を記述することを目的としている．高速道路構造物は一般的に他の資産と比べて規模が大きく複雑な構成になっている．しかも，構造物それぞれの構造や機能が画一的ではなく，置かれている使用環境が異なっている．

したがって、材料学的・力学的な視点のみで、現実に現れる構造物の劣化状態のバラつきを分析することは不可能である。さらに、個々の変状や損傷に対して適切な延命化のための措置を講じるためには、構造物全体というマクロな視点からの評価だけではなく、局所的な変状や損傷に対するミクロな分析が不可欠である。

構造物の劣化は基本的には小さな変状が発生し、それが時間経過とともに質的・量的に変化し、いずれ点検においても判別できる程度の変状として進展していく。したがって、構造物のマネジメントにおいて、劣化過程が進展していく途中のどのような段階において、いかに適切に補修行為を実施するかが重要な課題となる。現実の高速道路のマネジメントは、高速道路に要求される高度なサービスレベルを維持することで、安全な走行を定常的・安定的に提供することを業務の基本的な目的としている。そのために、点検行為を通じて日常的に発生する個々の変状を発見し、逐次・適時に補修することにより、構造物の健全性を維持し変状や損傷の進展を抑制することを目的として実施されてきた。しかし、高速道路構造物のマネジメントという視点に立てば、既往研究においても分析がほとんど蓄積されていないいくつかの研究課題が残されている。構造物において顕在化した変状の累積数が、時間の経過に伴って増加することは明らかな事実である。しかし、構造物全体にわたって出現する変状数や累積数の時間的分布に関する研究事例はほとんど蓄積されていない。したがって、将来に必要な補修量に関しては、概ね感覚的な把握にとどまっているのが現状である。さらに、劣化過程は単なる物理現象・自然現象ではなく、補修行為との相互作用を通じて進展するものである。例えば、床版防水工の施工により水を遮断することによって、補修以降における疲労損傷や床版上面損傷の発生を抑制することができる⁹⁾。一方、例えば、漏水という変状を放置すると、コンクリート剥落という別の変状を引き起こす。現実に高速道路で発生した変状が未補修のまま長期間経過観察の状態経過していると

いう実態を踏まえれば、未補修変状の経過観察の必要以上の継続が将来時点における新たな変状の発生に影響を与えていることが考えられる。言い換えれば、発生した変状に対して迅速な補修をすることが、将来時点に起こりえる潜在的な変状の発生を抑制するという効果を有していることを意味している。このような補修行為がもたらす変状発生抑制の因果効果¹⁰⁾に関しては、筆者の知る限り、あまり研究が蓄積されていない。

ISO5500x はアセットマネジメントシステムを標準化し、種々のマネジメント行為のルール化を通じて組織的に必要な手続き等を明確化し、マネジメントシステムの継続的改善により構造物の品質や確実性の向上等を図ることを目的としている¹¹⁾。しかし、わが国の構造物マネジメントの現場では、現場に立脚した「フィールド的な暗黙知」¹²⁾に帰属するような知識に依存する部分が大きく、現場の技術者は過去の経験や現場的判断に準拠して、個別課題に対し意思決定することを日常的に迫られているのが実情である。補修行為とは、点検による変状発見という情報を出発点にして、補修工事という契約行為に結び付けるまでの、情報をベースとした収集・探索・意思決定・契約・履行確認行為の過程である。資産管理における不確実性や組織内の知識マネジメントの非効率性が、のちに **3.5** で述べるようにマネジメントにおけるさまざまな取引費用¹³⁾を発生させることとなる。このような取引費用の存在が、構造物マネジメントにおけるさまざまな非効率性を発生させるメカニズムに関しても研究がほとんど蓄積されていない。例えば、構造物マネジメントの実践において、「(ある特定の変状を)なぜ、いま補修しようとするのか」、「なぜ、いま補修を留保するのか」という補修行為に関する意思決定のメカニズムに関する実証的な研究も著者の知る限り蓄積されていない。さらに、前述したように補修行為と変状発生過程との間の相互作用に関する理解があって初めて、構造物マネジメントの課題が見えてくる。しかしながら、

補修という人為行為を内包する形で構造物のマネジメント過程を包括的に論じている研究事例は、少なくとも道路構造物に関しては筆者の知る限り見当たらない。

3.2.2 構造物マネジメント上の課題

高速道路の構造物マネジメントにおいては、構造物の状態や過去の経緯を正しく認識した上で、構造物の健全度をある一定の状態で維持し続けるような定常的なマネジメントサイクルを構築しなければならない。さらに、マネジメントの過程で発見された問題点や課題を解決するための継続的改善のマネジメントサイクルを構築する必要がある¹¹⁾。本論文では、構造物マネジメントの現場において実施されている「点検による変状の発見からその補修を実施する」までの一般的なプロセスを模式的に図-2.9に示すように表現した。構造物マネジメントは、1) 剥離系，漏水系，初期欠陥系等に関わる多様な変状の発生に対して、2) 点検による変状の発見，3) 道路管理者による変状の認識と補修に関する（優先順位の）判断，4) 補修に関する図面作成，契約手続を経て補修の実行という行為で対応するプロセスである。その際、3.2.1で考察したように、変状間の相互作用，補修行為との相互作用，未補修変状数が補修行為に影響を及ぼす可能性等の複雑な連関構造が存在している。これらの問題を認識した上で、現場における人的・金銭的制約の中で補修箇所数と変状発生数とをバランスさせ、未補修変状数が継続的に増加することがないように補修計画を立案し、構造物の健全度をある一定の状態で維持させていくことが必要である。このような構造物マネジメントが効果的に機能するためには、1) 維持補修に関する意思決定を具体化するルール作成，2) ルールからの曖昧性の排除，3) 担当者の役割の明確化も含めたマネジメント体制の構築，4) 点検から補修に至る一連の行為を強制的に施行するためのガバナンス，5) 意思決定から補修に至る一連の行為を支援するツールの充実，6) 担当者の意識改

革, 7) マネジメントの監視・検証に関する一元的コントロールが可能なマネジメント体制およびそれらの継続的改善を実施するための仕組みが必要となる。これが, 2.3.1 で示した保全事業システムの制度設計に相当するものであり, このような仕組みを通じて, 図-2.9 の上半分に記載している人のマネジメントサイクルが機能することになる。

しかしながら, 高速道路の構造物マネジメントの現場において, 図-1.1 に示すように未補修変状数が経年的に増加しており, 図-2.9 の下半分に示すような新規変状数と補修箇所数をバランスさせる「未補修変状数の定常化サイクル」等(変状のマネジメント)が必ずしも適正に機能しているとは言い難い。残念ながら, 現時点における未補修変状の蓄積量や今後の変状発生数の推移に関する評価や, それに対する課題解決や対処の方法が維持補修の現場において確立されている状況にはない。このため, 「今, 何をすべきなのか」という方針に客観性・定量性を欠くこととなり, 現場の技術者の間で危機感・切迫感を共有することが難しくなっているものと考えられる。現在の劣化状態や変状規模は「どのような経緯を経て」, 「何が原因となって生み出され」, 「今後どう推移して行くのか」, 「補修行為はどのような効果やどの程度の付加価値があるのか」, すなわち「変状と補修の間の相互関連構造」について包括的に明確化することができれば, 維持補修の方針や業務の進め方に関する納得感が現場末端まで共有され, そのことにより人のマネジメントの改善が同時に図られることを通じて, 構造物マネジメント全体の効率化・合理化・適正化に繋がって行くことが期待される。本章では, 第2章で示した, 「相手を正確にまず知った上で, それに基づき人の行動(補修行為)を律する方策を考える」ことを具体化する。

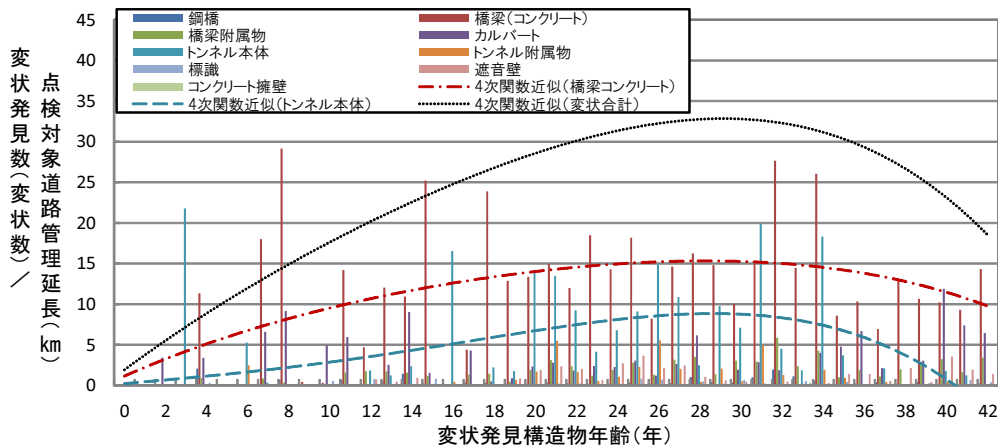
3.3 高速道路構造物における変状発生

3.3.1 変状特性

本章では、NEXCO 西日本が管理するある高速道路区間を実証分析の対象としてとりあげ、そこで発生している変状と補修行為を分析対象とする。対象とする道路延長は1,054km（うち橋梁延長259km，トンネル延長277km）であり，この道路構造物を現場事務所土木保全人員200名弱，概ね700億円程度の年間事業費で管理している。構造物年齢は最大で43年であり，平均年齢は約30年である。構造物点検は基本点検，日常点検，詳細点検，植栽点検，施設点検等により構成されている。このうち，中長期的な構造物マネジメントに関わる詳細点検は，橋梁，トンネル，のり面，カルバート，標識，遮音壁などを対象として，近接・打音・触診等の手法により5年に1回の頻度で実施している。点検結果は，小さな変状1つ1つを網羅的に数え上げ判定する個別判定と，一連の構造物を1つの単位で主に構造的安全面から評価する健全度評価の2つから成り立っている。個別判定はAA，A1，A2，Bなどに区分して判定される。このうち，AA～A2は補修期限の目安が設定されている。第三者に剥離片等の落下被害を及ぼす恐れがある場合にはEという記号を併記している。健全度評価は，橋梁の場合は1連や1橋単位で，健全度グレードI～Vで評価される。個別判定結果に基づいて，第三者被害の防止やライフサイクル費用最小化の観点から変状に対して適宜・適時に補修が実施される。さらに，橋梁全体の健全度評価が実施され，リニューアルプロジェクト等の大規模更新・修繕等の必要性が検討される。したがって，個別判定に基づく変状データが維持管理において最も基礎的で重要なデータとなっており，本論文ではこの個別変状データに基づいて分析を進める。対象とする道路区間において，供用時点から現在までの全ての変状発生・補修データが残っているわけではなく，橋梁等主要構造物を対象として過去12年間（平成17年度以降）のデータが記録・

保存されている。平成29年4月現在までに詳細点検で把握された、小さな変状一つ一つを網羅的に数え上げる個別判定の元となる個別変状の総変状発生数は414千件である（これらの変状には軽微な初期損傷も含まれるため、そのすべてが即座に補修行為の対象となるわけではない）。個別変状は部材・部位等の発生場所や変状種別・発生原因等の情報を持つが、一例として個別変状を構造物別あるいは変状種別別に集計した内訳を図-2.2に示している。補修についても、個別変状一つ一つに対して補修されたかどうか記録・保存されており、これらの変状の中で、すでに補修あるいは仮補修（道路構造物が満足すべき性能のうち第三者被害防止のみを先行的に対処する補修であり、主には剥落防止ネット対策）を実施した箇所は2割強であり、相当数が未補修状態で累積している。未補修変状数は、過去数年のデータに関する限り、増加傾向を示している。

現在、図-2.9の概念図に示すような保全事業システムを確立し、点検、補修計画立案、補修実行、監視のサイクルを実施しているが、このようなマネジメント過程において約400千件の補修すべき変状が存在している。このような変状の発生数が今後も継続的に増加していく発散傾向にあるのか、あるいは増加しつつも新規発生数が次第に減少していく収束傾向にあるのかという変状全体量の将来予測が必要である。また、点検データベースに記録される変状の種類として初期欠陥、外力作用によるもの、漏水など非常に多様な種類がある。さらに、変状の内容も多様であり、当初設計上想定していない変状（古い橋梁のRC床版のひび割れ、塩害、ASR、PCグラウトホース内の漏水など）、材料学的に不可避的ではあるが一定の予測が可能な変状（中性化、塩害など）、他の変状の発生に影響を及ぼす変状（ひび割れ、漏水全般）、構造的冗長性を低下させる変状（PCケーブル腐食、トラス部材腐食など）、第三者被害に繋がり得る変状（剥離全般）などが存在する。これら変状の「発生数」「将来推移」「内容」「補修期限」「発生原因」「リス



注) 近似曲線として、多項式近似曲線(1次~4次)、および対数多項式近似曲線を想定し、重相関係数が最も大きくなる4次関数曲線を近似曲線として採用している。構造物別の近似式 y と重相関係数 R は以下の通り。
 ・変状合計の近似式: $y = (-2E - 05)x^4 + 0.0011x^3 - 0.0411x^2 + 1.9569x$, 重相関係数: $R = 0.655$
 ・橋梁(コンクリート)の近似式: $y = (-1E - 05)x^4 + 0.0007x^3 + 0.0359x^2 + 1.1846x$, 重相関係数: $R = 0.528$
 ・トンネル本体の近似式: $y = (-2E - 05)x^4 + 0.0008x^3 - 0.0042x^2 + 0.233x$, 重相関係数: $R = 0.465$

図-3.1 構造物別の経過年数別変状発見数

ク」「他の変状に及ぼす影響」等の多様な側面から、個々の変状および変状全体量が持つ課題を認識した上で、適切な維持補修計画を策定することが重要となる。

3.3.2 変状の時間的発生状況分析

図-3.1に、対象とする高速道路区間の供用開始時点から現在に至るまでの変状の時間的発見過程を示している。横軸は変状発見時の構造物年齢であり、縦軸は個別判定により把握された変状の発見数である。対象道路区間を構成する構造物の種類は多岐にわたるため、主たる構造物(鋼橋、コンクリート橋、カルバート、トンネル、附属物等)のみを対象とし、平成22年度以降に発生した全変状種別の構造物ごとの変状発生数の時間経過を示している。同図には、変状発生数の経年的変化特性の把握を容易にするために、経年的発生数の推移を最小二乗法により曲線近似を行った結果を併記している。図-3.1の横軸は変状が発見された時点での構造物年齢を示している。詳細点検のサイクルが基本5年であるために、同図における変状発生時刻は最大で5年の誤差が生じる可能性があることに留意され

たい。なお、5年以上の遅延が生じていると考えられるデータは除外している。また、同図には設計基準、累計交通量、散布塩分量等の環境条件が異なる構造物が混在しており、様々な年代の構造物の重ね合わせとなっている。累計交通量と散布塩分量に関しては、構造物年齢の増加に伴って累積的に増加する項目であるために、変状発生数の経時的変化に着目すれば、構造物年齢がこれら要因の影響をある程度反映していると考えられる。一方で、設計基準に関しては、その変遷は詳細に記録されてはいるものの、設計基準を数値化する際の恣意性の排除を優先して、本論文においては設計基準については言及しないこととした。

変状全体の発生数の時間的变化（図-3.1中の点線）より、変状の発生数は構造物年齢が約30年の時点で最大となり、それ以降は収束傾向に転じる、すなわち有限であることが読み取れる。したがって、今回検討対象としたNEXCO西日本におけるデータの限りにおいては、構造物年齢40年前後の古い路線に限定すれば、今後の老朽化に伴って変状の発生数がさらに増加し続けるような発散傾向にはなく、変状発生数は収束段階にあるのではないかと考えることができる。このような変状の発生数の有限性については、道路構造物固有の特性に由来すると考えられるが、一方では補修行為による新規変状の抑制効果と考えることもできる。具体的には、一部の橋梁床版では、床版に変状が顕在化していなくても舗装補修工事の際に床版上面の補修を施したり、あるいは床版防水工等を施したりするなど、予防的処置が実施される。このような予防的処置により、新規変状を抑制し得る可能性がある。

表 - 3.1 変状種別の系への分類

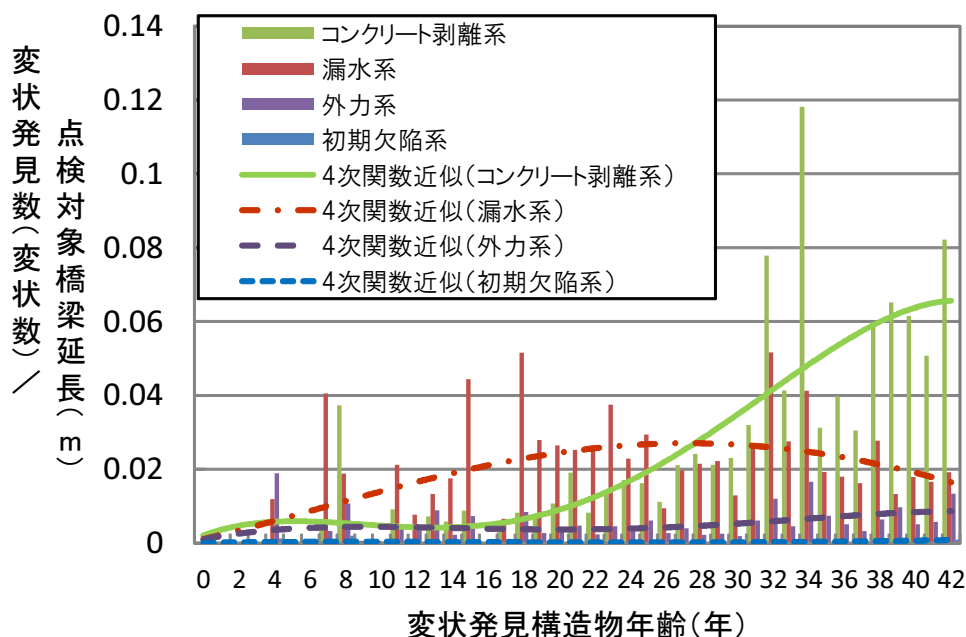
初期欠陥系	漏水系	コンクリート剥離系	外力系
空洞	漏水	はく離	ひび割れ
豆板	エフロレッセンス	浮き	変形・破損
異物混入	錆汗	鉄筋の露出・腐食	車両接触跡
その他	排水管の脱落・腐食	定着部の変状	その他
	伸縮装置の漏水	その他	
	非排水装置の損傷		
	その他		

3.4 変状相互間の関連性に関する分析

3.4.1 変状発生状況の変状別時間特性

変状を構造物別、変状種別ごとに分類し、変状相互間の関連性を詳細に分析する。構造物別に分類する際、構造物を詳細に分類して個々の分類ごとに特性を捉えることも可能であるが、本研究では、変状全体の6割を占め、変状データが長期に亘って蓄積されている橋梁に焦点を当てることとする。橋梁の変状種別は約150種類あるが、変状の発生状況を図-2.3に示すように発生原因と現象に基づき整理することができる。さらに、これらの変状を、発生原因や点検の実情を踏まえて、表-3.1に示すようにに4つの系（初期欠陥系、漏水系、コンクリート剥離系、外力系）に分類した。例えば、コンクリート剥離系は中性化・塩害・水掛かり等による鉄筋腐食に起因するものに限定し、凍害は除外している。また、漏水系は原因には拘らず、現象そのものとして区分している。

これら4つの系の変状の時間的発見状況の分布を図-3.2に示している。同図では、橋梁に発生する変状のみを分析対象としているために、図-3.1と異なり、縦軸の変状発見数を単位橋梁長に基準化して示している。さらに、時間発生過程の特性を把握するために、発生時間分布を4次関数を用いて近似した結果を併記している。図-3.2に示すように、漏水系の変状は供用後、比較的早い段階から出現していることが理解できる。それに対して、コンクリート剥離系の変状は漏水系



注) 近似曲線として、多項式近似曲線(1次~4次)、および対数多項式近似曲線を想定し、重相関係数が最も大きくなる4次関数曲線を近似曲線として採用している。変状種別別の近似式 y と重相関係数 R は以下の通り。

- ・コンクリート剥離系の近似式： $y = (-2E - 07)x^4 + (1E - 05)x^3 - 0.0003x^2 + 0.0024x, R = 0.822$
- ・漏水系の近似式： $y = (2E - 08)x^4 + (-2E - 06)x^3 + (4E - 05)x^2 + 0.0011x, R = 0.572$
- ・外力系の近似式： $y = (-3E - 08)x^4 + (3E - 06)x^3 - (9E - 05)x^2 + 0.0011x, R = 0.420$
- ・初期欠陥系の近似式： $y = (-1E - 09)x^4 + (2E - 07)x^3 - (7E - 06)x^2 + (9E - 05)x, R = 0.414$

図 - 3.2 変状種別別の経過年数別変状発見数

の変状と比較して、時間遅れを伴って発生している。構造物年齢が40年前後に到達したような道路構造物においては、コンクリート剥離系を除いた他の変状の新規発生数は次第に減少している。一方で、コンクリート剥離系の変状は、供用後20年前後を経過した時点から急激に顕在化し始め、供用後40年程度が経過した現時点においても増加基調にあり、当面の間、変状発生数が多い状態で推移することが読み取れる。近年、劣化が著しくなっているという感覚は、特にコンクリート剥離系の変状の多発によって印象付けられているのではないかと想像される。構造物年齢が25年前後の中間的な年齢の道路構造物では、漏水系の変状の発生数が最大となっている。今後、構造物年齢40年程度の道路構造物と同じよう

な劣化過程を辿ると仮定すれば、今後コンクリート剥離系の変状が漏水系の変状を上回る規模で発生することが予測できる。ただし、図-3.2に示す変状の発生過程は、単なる自然の劣化現象ではなく、橋梁に対する補修行為を含んだ結果としての変状の発生である。したがって、構造物マネジメントの確立や新技術の実用化など、補修が適切化されることによって、現時点で構造物年齢が小さい道路構造物が、必ずしも構造物年齢の大きい道路構造物と同じような劣化過程を辿るわけではない。たとえば、初期欠陥や外力に起因するひび割れ、施工目地が補修されると、漏水は抑制され、さらにそれによって凍結防止剤等に起因する塩害系の剥離変状の発生を低減させることができる。一方で、これらの補修が適切な時期になされなければ、将来時点においてより多くの剥離変状の発生を引き起こす結果となる。維持補修の現場では、漏水系の変状は、それだけでは構造物本体に与える影響が深刻ではないと判断され、ともすれば補修優先順位が低く設定される傾向がある。しかし、漏水系の変状が第三者被害の主原因であるコンクリート剥離系の変状の発生を誘発するという因果関係に着目すれば、漏水系の変状への対処方法を根本的に改める必要性を指摘することができる。さらに、現場の道路管理者が短期的に異動を繰り返すことを併せて考えると、漏水系の変状に対する対処方法を明確なルールとして規定することが不可欠である。図-3.2に示すように、漏水系の変状とコンクリート剥離系の変状の発生数が最大となる構造物年齢を比較すると、漏水系の変状の発生とコンクリート剥離系の変状の発生間に約15年のタイムラグが存在している。このことは、漏水系変状に対する補修実行に一定程度の時間的猶予が存在していることを意味しており、漏水系変状に対しては計画的補修計画を立案し補修を実行していくことが有効であることを示唆している。本章では、橋梁構造物における漏水系変状とコンクリート剥離系変状の関係について考察したが、今後道路構造物に発生する多様な変状間の因果関係に関する分

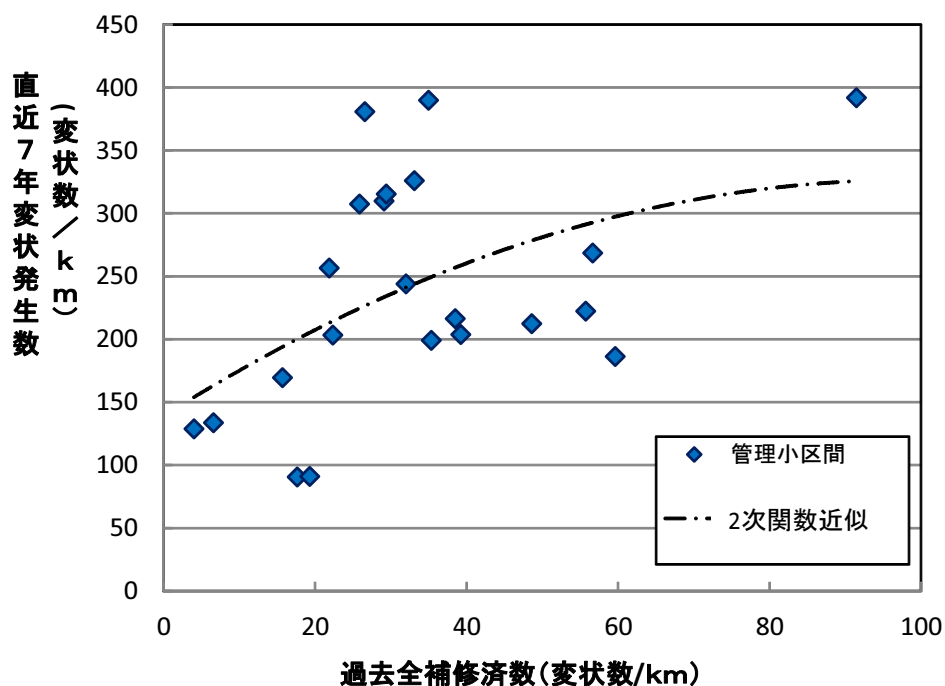


図 - 3.3 変状発生数と過去全補修済数の関係

析を蓄積することにより、構造物マネジメントにおける補修の優先順位に関して再検討することが重要な課題として残されている。点検で発見された変状に対して適切なタイミングで適切な内容の補修を実施することにより、ライフサイクル費用の低減を図ると同時に、図-1.2 に示す第三者被害をさらに抑制することが可能になると考える。

3.4.2 補修による変状発生抑制効果

ここからは、補修行為が変状の発生に与える影響を分析する。分析対象としている高速道路区間を、ある事務所が管理するある路線のように事務所と路線のペアによって表される道路区間を1つの管理小区間と定義し、合計22個の管理小区間に分割した。図-3.3は各管理小区間ごとに平成22～28年度（直近7年間）の変状発生数と平成17年度以降に補修された箇所数（過去全補修済数と呼ぶ）の関係

表-3.2 管理小区間（事務所別かつ路線別で分割）と区間特性

変状発生数	説明変数									管理小区間
	補修済数	凍結防止剤	大型車軸数	ASR	内在塩分	構造物年齢	橋梁延長	トンネル延長	未補修数	
133.7	13.2	0.064	0.056	0.000	0.000	20.2	475	180	89.3	1
309.8	54.4	0.064	1.056	0.000	0.000	25.6	436	473	129.4	2
307.4	18.8	0.000	0.531	0.000	0.000	28.8	1153	317	-	3
389.8	29.5	1.197	0.350	0.000	0.000	31.8	451	0	92.0	4
391.8	36.3	0.033	0.061	0.000	0.000	27.2	578	478	107.1	5
380.8	30.4	0.109	0.887	0.096	0.000	28.6	306	337	103.0	6
186.2	23.1	1.000	0.468	0.000	0.684	37.9	137	47	41.7	7
216.3	19.5	0.557	0.500	0.000	0.978	39.0	147	102	29.4	8
203.3	10.9	0.062	0.315	0.000	0.000	19.4	431	331	50.9	9
315.4	23.9	0.126	0.775	0.003	0.000	26.9	361	582	78.6	10
199.2	18.8	0.080	0.046	0.000	0.000	16.8	452	141	19.8	11
90.7	9.3	0.023	0.026	0.000	0.000	11.4	297	502	3.5	12
203.8	49.6	0.072	0.012	0.000	0.000	13.8	584	407	2.8	13
326.0	29.3	0.432	0.339	0.029	0.000	32.2	515	384	104.5	14
222.3	18.2	0.879	0.316	0.077	0.273	34.3	238	440	85.2	15
128.8	11.0	0.023	0.011	0.000	0.000	13.3	288	27	55.4	16
91.1	6.0	0.492	0.037	0.000	0.000	25.7	184	147	73.0	17
212.4	36.7	0.469	0.585	0.000	0.000	40.5	118	108	39.1	18
256.6	24.4	0.137	0.051	0.000	0.000	19.8	285	226	68.3	19
169.5	5.2	0.164	0.110	0.000	0.000	24.0	261	0	49.4	20
268.4	49.9	0.094	1.000	0.000	0.000	24.8	318	409	104.0	21
244.0	35.0	0.285	0.104	0.000	0.000	24.8	260	433	50.4	22

注) 各特性変数の意味は以下の通りである。
 ・補修済数：平成 22 年度以降に発見された全変状のうち、平成 28 年末において補修済の変状数を対象区間の管理延長で除した値
 ・凍結防止剤：累計凍結防止剤散布量 (t/km) の対象区間に存する橋梁の連数での加重平均値を最大事務所の加重平均値で除した値
 ・大型車軸数：累計大型車軸数 10t 換算値 (軸) の対象区間に存する橋梁の連数での加重平均値を最大事務所の加重平均値で除した値
 ・ASR：ASR の疑い有=1、疑い無=0 とし、対象区間に存する橋梁の連数での加重平均値
 ・内在塩分：内在塩分の疑い有=1、疑い無=0 とし、対象区間に存する橋梁の連数での加重平均値
 ・構造物年齢：対象区間の構造物年齢の供用単位ごとの道路管理延長での加重平均値
 ・橋梁延長：対象区間に存する上下線別橋梁延長 (m) を道路管理延長 (km) で除した値
 ・トンネル延長：対象区間に存する上下線別トンネル延長 (m) を道路管理延長 (km) で除した値
 ・未補修数：平成 23 年以前に発見された漏水系変状のうち、平成 28 年度末まで未補修の変状数を対象区間の管理延長で除した値。
 ただし、管理小区間 1 か所のみデータ欠損となっている。

を表している。ここでは、図-2.2 に示した構造物に発生するすべての変状を対象としている。過去全補修済数は補修行為の実績を表す指標である。また、各ケースの条件を揃えるために、両数値ともにそれぞれの事務所の管理延長で除した値を用いている。

図-3.3 より、過去の全補修済数量と直近 7 年の変状発生量は単純な比例関係にはないことが読み取れる。このことは、過去の時点における補修行為による予防保全の効果（ここでは、ある変状に対する補修を行うことによって、その変状に誘因される形で生じる変状の発生が抑制される効果を指す）が存在していることを示唆している可能性がある。予防保全効果の原因を特定化するために、各管理小区間における直近 7 年の変状の発生数と管理小区間特性の関係を分析する。各管理小区間の変状発生の実態と区間特性を一括して表-3.2 に示している。同表では、管理小区間ごとに、直近 7 年間に発生した単位管理長あたりの総変状数、および

表 - 3.3 直近の変状発生数と補修行為ならびに区間特性の関係

y:変状発生数, x:説明変数, $y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_8 x_8$									
説明変数 パラメータ	(定数項) β_0	補修済数 β_1	凍結防止剤 β_2	大型車軸数 β_3	ASR β_4	内在塩分 β_5	構造物年齢 β_6	橋梁延長 β_7	トンネル延長 β_8
回帰係数	-1.358	2.370	24.02	27.21	743.4	-68.23	3.852	0.1588	0.01425
t-値	-0.019	1.737	0.348	0.425	1.138	-0.890	1.178	2.094	0.134

各区間における単位区間長あたりの補修済変状数と漏水系の未補修変状数を記載している。そのほかに、変状の発生に影響を及ぼす要因として凍結防止剤累計散布量、累計大型車 10t 換算軸数、ASR の疑いの有無、内在塩分の疑いの有無、構造物年齢、単位管理延長当たりの橋梁/トンネル延長の比率をとりあげている。まず、(目的を特定しないすべての変状に対する) 過去の補修実績と直近の変状発生数の間の関係を分析するために、直近の単位距離当たりの変状発生数を被説明変数とし、単位距離当たりの補修済数、および一般的に劣化要因とされている 4 項目（凍結防止剤累計散布量、累計大型車 10t 換算軸数、ASR の疑いの有無、内在塩分の疑いの有無）とその他の項目（構造物年齢、単位管理延長当たりの橋梁/トンネル延長の比率）を説明変数に加えて重回帰分析を実施した。その結果を表-3.3 に示す。もちろん、管理小区間数が限られているため重回帰モデルとしての信頼性には限界があるが、変状発生数と各管理小区間特性との相関の強度に関して有用な情報を提供しうると考える。表-3.3 より、一般的に劣化要因とされている 4 項目と変状の発生数との相関が低い (t 値が小さい) ことを読み取れる。一般に、これらの要因は高速道路構造物の主たる劣化要因として考えられており、個々の構造物に対して補修方法を検討する際には重要な劣化因子である。しかし、本章で対象とする管理小区間に関する限り、これらの劣化因子が原因として発生している変状数が相対的に少ないことが原因になっていると判断することができる。また、凍結防止剤等の環境要因や材料的な要因が変状発生の主要因ではなく、図-3.3 に示したように、未補修変状を長期間にわたり経過観察した結果が新たな変状を

表-3.4 直近の変状発生数と漏水未補修数の関係

y:変状発生数, x:説明変数, $y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3$				
説明変数 パラメータ	(定数項) β_0	漏水未補修数 β_1	構造物年齢 β_2	橋梁延長 β_3
回帰係数	-92.23	0.8410	5.812	0.3640
t-値	-1.269	1.912	2.872	3.032

発生させた可能性が存在する。そこで、漏水系の未補修変状の存在が、その後の変状の発生数に影響を及ぼしている可能性を重回帰モデルを用いて分析した。具体的には、漏水系の補修行為に関連する指標として漏水未補修数を新たに重回帰モデルの説明変数としてとりあげた。重回帰モデルの推定結果を表-3.4に示している。表-3.4より、構造物年齢と橋梁延長のt値が大きくなっている。供用後、時間が経過した構造物や多くの橋梁を管理している管理小区間において、相対的に多くの変状が発生している。一方、漏水未補修数のt値は1.912であり、対象とする管理小区間のサンプルに対して有意水準5%を満足するような説明力を有しているとは言えないものの、有意水準10%で説明力がないという仮説を棄却できない結果になっている。すなわち、管理小区間という空間的に集計化されたデータを対象としたマクロな分析を通して、漏水未補修数と変状発生数に関連性が存在する可能性を示唆することができた。すなわち、図-3.3で指摘したように、漏水変状に対する補修が、将来の予防保全の効果を生み出している可能性があるため、今後はよりミクロな個別変状を対象とした因果関係に着目し、漏水変状に対する補修が有する予防保全効果に関して分析していくことが必要だと考える。

以上、図-3.2に示した変状発生数の時間的推移、および表-3.4に示した直近の変状発生数と漏水変状未補修数との関連性に関する分析は、漏水変状に対する未補修数の蓄積が、近年の変状発生数の増加につながっている可能性を示唆している。この因果関係が事実であれば、漏水に的確に対応することにより、その後の

変状発生を抑制できることが可能となる。一方、老朽化がすでに進展した道路区間では、すでにコンクリート剥離系の変状が顕著に表れてしまっているために、リニューアルプロジェクトで対応せざるを得ない。しかし、比較的経過年数の小さい区間では、漏水変状に対して計画的に対処することにより、将来の変状発生数や必要事業費を大幅に抑制することが可能であると考えられる。

3.5 マネジメントと変状発生に関連性分析

3.5.1 未補修変状数と年間補修量の関係性

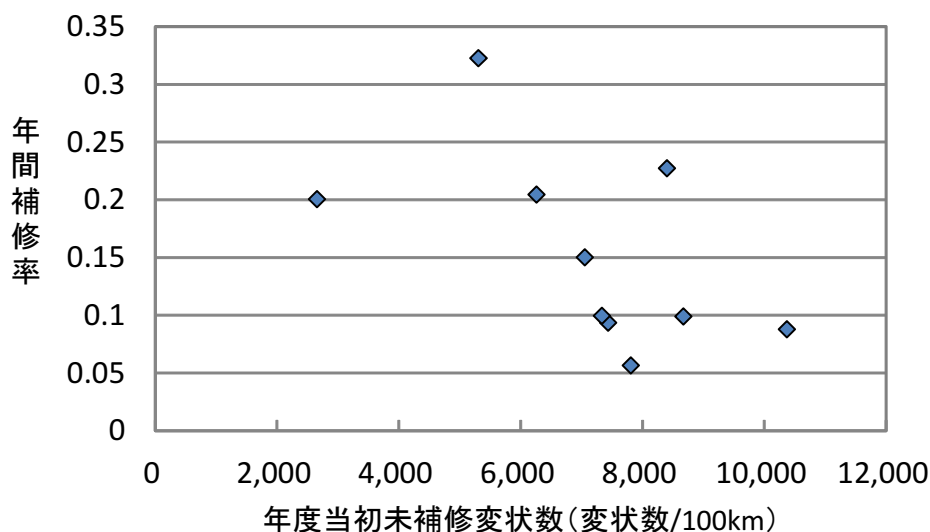
3.4において、適切なタイミングに補修を実施することにより、将来時点における変状の発生、あるいは変状の拡大を抑制できる可能性を示した。しかし、維持補修の現場では、適切なタイミングに補修が実施されず、未補修変状のまま経過観察の状態にあることが少なくない。言うまでもなく、ある年度における補修の実施は、当該年度における補修箇所を選定という意思決定の結果であることは論をまたない。以下では、各年度における補修箇所に関する意思決定が実施される意思決定環境と意思決定の結果の関連性を分析する。道路構造物に対する点検は、構造物全体にわたり網羅的に実施されており、点検を通して発見された変状はデータベースに蓄積されている。さらに、発見された変状に対して、補修の優先順位を決定し、適切なタイミングに適切な補修を実施し、その結果をデータベースに記述することは、情報の量・質の両面から論理的に可能である。さらに、このようなメンテナンスサイクルを現場で機能させるためのマネジメントシステムが導入されている場合も少なくない。たとえば、NEXCO 西日本では図-2.9 に示したような構造物マネジメントシステムの設計にあたり、「知らないでいることができない」状況の構築をめざしている。現場の管理責任者は、強制的に少なくとも量的な側面での変状の全貌を知らされるスキームが導入されている。しかし、この

ような情報システムに基づいて、管理責任者が変状に対して的確な対応することが理論的には可能であっても、現場において常にこのような的確な対応ができているという保証はない。すなわち、構造物マネジメントにおける理想的な補修行為と現実の補修行動との間のかい離が発生する原因を分析するためには、管理責任者は「どのような判断基準に基づいて補修の実施に関する意思決定を行っているか」に関して客観的に分析する必要がある。

図-3.4 に、10 箇所の事務所別の年度当初未補修変状数（平成 28 年 3 月当初時点における未補修変状数）と年間補修率（平成 28 年 3 月から平成 29 年 3 月までの 1 年間の変状補修量を年度当初未補修変状数で除した値）の関係を示している。変状および補修は全構造物の全変状種別を対象としている。なお、事務所間の条件を統一するために両者を管理延長で除した 100km 当りの値を用いている。変状を認識して補修が行われるために、未補修変状が多ければ補修の規模も大きくなると考えられるが、図-3.4 より、必ずしもそのような単純な関係にはならないことが読み取れる。

3.5.2 意思決定における限定合理性

補修行為は管理責任者による意思決定の結果であり、意思決定の内容には管理責任者の個人的資質や性格、管理責任者が所属している組織やさまざまな制度的条件が影響を及ぼすことになる。管理責任者が、意思決定に関わるさまざまな影響要因をすべて考慮するためには膨大な心理的・時間的費用が発生する。未補修変状数が増加するほど、変状の補修に関する意思決定のための情報・時間的費用は増加する。あるいは、管理責任者が現場の変状全体を正しく認識できていない結果として、補修判断の適切性が低下する可能性も否定できない。さらには、災害の心理学で議論されているような正常性バイアス¹⁴⁾や変状慣れにより、危機感が働



注) 縦軸, 横軸ともに 100km 当たりの値である。

図 - 3.4 年間補修率と未補修変状数との関係

かず補修が実施されなくなるというリスクも理論的には考えられる。このように管理責任者の意思決定には、合理的な意思決定を妨げる多様な取引費用¹³⁾が発生するため、現実の意思決定は限定合理的にならざるを得ない。このような意思決定環境に介在する限定合理性が、補修の実施判断を遅らせる方向で作用し、未補修変状数が増加する結果を招くことになる。さらに、未補修変状数の増加が、管理責任者による意思決定問題を複雑にし、その結果として未補修変状数が累積的に増加し続けるという悪循環に陥る危険性が高まる。

管理責任者の意思決定における限定合理性に関わる要因として、「情報」、「人員」、「財源」という3つの要因に着目する。「情報」に関しては、管理責任者や現場の技術者が未補修変状に関わる情報を的確に把握できているかという問題があげられる。「人員」に関しては、個々の事務所が抱えている未補修変状に対して、それに対処しうる十分な人員が確保できているかという問題である。「財源」に関しては、補修に必要な財源が確保されているかという問題である。多くの地方自治体

や道路管理者が抱える重要な問題として、補修財源確保の問題があげられる。事実、多くの道路管理主体では、財源が確保できないため、適切な補修が実施されていないという問題が発生している。しかしながら、本論文の実証分析の対象としている NEXCO 西日本に関する限り、近年協定変更や事業計画変更が繰り返されてきたために、図-2.8 に示すように、民営化前後の時点ほど逼迫した状態ではない。また、財源は、人員数とは通常高い相関関係にあるはずのもので、さらに、被説明変数である補修量と同義の項目であり、補修量と同様に意思決定の結果であるとも言える。本論文で対象としている問題の本質は、道路管理者は事業費に関連する様々な諸問題が全て解決できたとしても、果たして適切に補修を実施することができるか否かであり、以下では「財源」以外の「情報」および「人員」に論点を絞って分析を実施する。

補修行為に対して未補修変状数と人員体制が影響を与えるのか否かを明らかにするために、これらのマネジメントに関わる情報が獲得可能な 9 事務所を対象として、事業費の制約がほぼ無くなったと言える直近 1 年間における年間補修率、年度当初未補修変状数、未補修変状数当たりの土木人員数を算定した。その結果を表-3.5 に示している。年度当初未補修変状数が多くなるほど、現場の管理者が未補修変状のすべてに関する情報を把握することが困難になると考える。また、現場における人的資源の制約を表現するために未補修変状数当たりの土木人員数を用いている。これらの情報、人員という要因と年間補修率の関係を分析するために、これら 2 つの要因のそれぞれを説明変数、年間補修率を被説明変数とした単回帰分析を実施した。その結果を表-3.6 に示す。表-3.6 より、未補修変状数の回帰係数が負であり、未補修量が多くなればなるほど年間補修率が減少していく傾向を読み取れる。一方、人員体制の回帰係数は正であり、人員体制を強化することにより年間補修率が増加していく傾向を読み取れる。以上より、年間補修率は

表 - 3.5 マネジメント要因と年間補修率の関係

被説明変数 年間補修率	説明変数		事務所
	年度当初未補修変状数	土木人員数/変状数	
0.227	8,404	0.00192	a
0.093	7,438	0.00263	b
0.099	8,671	0.00216	c
0.099	7,333	0.00215	d
0.056	7,811	0.00202	e
0.322	5,309	0.00424	f
0.088	10,371	0.00204	g
0.204	6,259	0.00363	h
0.150	7,055	0.00264	i

注) 各説明変数の意味は以下の通りである。
 ・年間補修率：平成 28 年 3 月から平成 29 年 3 月までの 1 年間の全変状種別における補修量を事務所ごとの道路管理延長で除した値を、下記の年度当初未補修変状数で除したもの
 ・年度当初未補修変状数：平成 28 年 3 月当初時点での全変状種別における未補修変状数を事務所ごとの道路管理延長で除した値
 ・土木人員数/変状数：事務所ごとの土木職員（施工管理的業務のアウトソーシング人員を含む）を上記の年度当初未補修変状数で除したもの

表 - 3.6 単回帰分析の結果

z:年間補修率, w:説明変数, $z = \gamma_0 + \gamma_1 w_1$		
説明変数 パラメータ	(定数項) γ_0	年度当初未補修変状数 γ_1
回帰係数	0.4325	-3.719E-05
t-値	3.193	-2.128
説明変数 パラメータ	(定数項) γ_0	土木人員数/変状数 γ_1
回帰係数	-0.05834	79.56
t-値	-0.8039	2.973

人員体制の増強により増加させることができるが、増強が不十分であれば補修率は上がらず、未補修変状数が増加していく。さらに、未補修変状数が増加すると補修率が下がるという悪循環に陥ってしまうことが理解できる。したがって、人員体制の強化により「年間補修率をどの程度まで維持すればよいのか」が重要な課題となる。表-3.5に示す、年間補修率は年間補修量を未補修変状数で除した値を表している。このため、年間補修率に関するサービス水準を求める問題は、「未補修変状数をどの程度に抑えておけばよいのか」という課題として解釈することもできる。対象とする現場の事務所における構造物マネジメントの改善を図るため

表 - 3.7 年間補修率に関する回帰モデル

z:年間補修率, w:説明変数, $z = \gamma_0 + \gamma_1 w_1 + \gamma_2 w_2$			
説明変数 パラメータ	(定数項) γ_0	年度当初未補修変状数 γ_1	土木人員数/変状数 γ_2
回帰係数	-0.02685	-2.749E-06	75.52
t-値	-0.081	-0.098	1.502

には、未補修変状の適切な管理水準とそのために必要な人員に関する情報が必要となる、現時点において、現場のマネジメントに関わるデータを入手することは困難であり、上述の9事務所の限られたデータに基づいた思考実験に頼らざるを得ない。このような思考実験を実施するために、未補修変状数と人員体制の両方を説明変数とする回帰モデルを作成し、2つのマネジメント要因が年間補修率に与える影響を概算した。作成した回帰モデルを表-3.7に示す。言うまでもなく、非常に限られた数のデータで作成した回帰モデルであり、その推計精度には限界がある。ここでは1つの思考実験として、表-3.7に示すモデルを用いて、年度当初の未補修変状数と人員体制を与件としたときに、年度末に繰り越す未補修変状数を求めることとする。このような思考実験を行うためには、年度当初未補修変状数をある水準に維持した場合に、毎年平均的に発生する新規変状数に関する情報が必要となる。図-3.5に示すように、年度当初未補修変状数と新規変状発生数の間には正の相関関係が存在する。年度当初未補修変状数と新規変状発生数の関係に対して、同図に示すような関係が成立すると考え、同図に示す単回帰モデルの推計結果を用いて、毎年新規に発生する変状数を [年度当初の未補修変状数] $\times 0.2567$ によって算出することとした。そのうえで思考実験を1)年度当初の未補修変状数と人員体制を初期値として与える、2)初期値に応じた補修率と新規に発生する変状数を計算する、3)計算した値と年度当初の未補修変状数を用いて年度末の未補修変状数を計算する、4)1)~3)を繰り返す、という手順で行った。以上の分析結

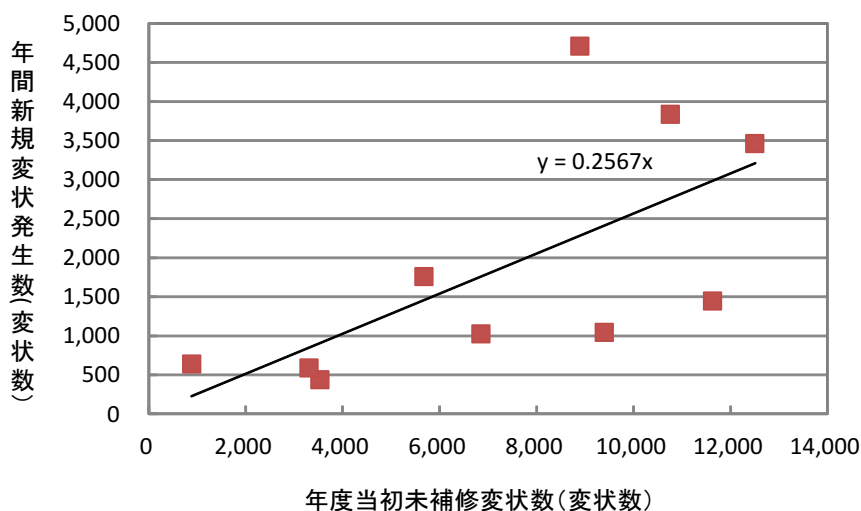


図 - 3.5 年度当初未補修変状数と新規変状発生数の関係

果を図-3.6 に示す。

思考実験の目的は、未補修変状数を継続的にある一定水準以下に維持できるようにするためには、どの程度の人員を確保することが必要であるかということを探ることにある。思考実験において、年度当初の未補修数と年度末の未補修数を比較し、年度末の未補修数が年度当初の未補修数より増加している場合には、未補修箇所が累積的に増加していくという悪循環が発生することを意味する。思考実験における人員数として、かりに分析対象としている NEXCO 西日本の現場事務所における人員体制を想定し、維持補修業務に対応する人員数である 20 名を想定する。この場合、図-3.6 に示すように、管理延長 100km 当りの未補修変状数 6,000 付近に分岐点が見られることがわかる。管理延長 100km 当りの未補修変状数が 6,000 箇所を超すと、年度内に補修する未補修変状数が新規に発生する変状数に追いつかず、未補修変状数が累積的に増加するという悪循環が発生する。図-3.4 に示すように、対象とする事務所の半数が抱える (管理延長 100km 当たりの) 未補修数が、すでに 6000 個を超えており、これらの事務所では未補修数が累積的に

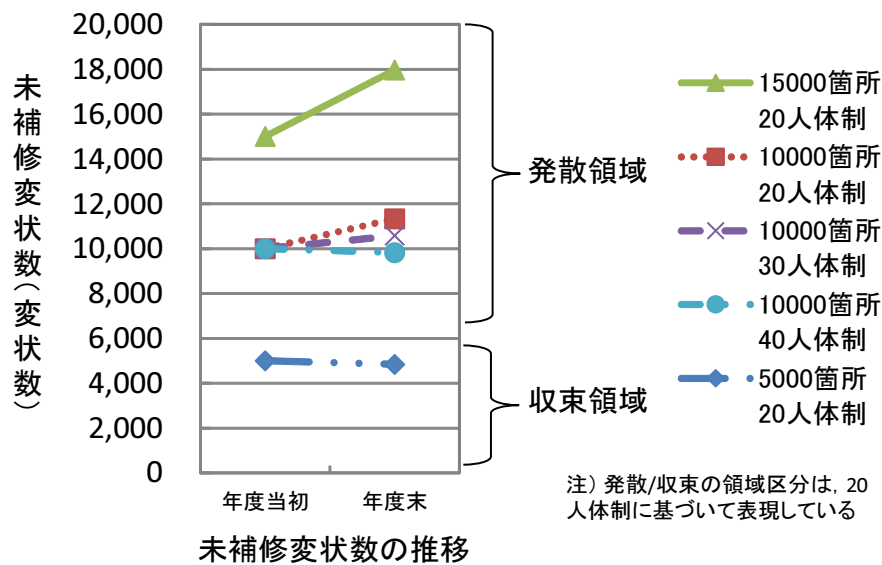


図 - 3.6 思考実験の結果

増加するリスクに直面していると考えることができる。もちろん，以上の分析結果は，簡単なモデルに基づいた思考実験の結果にすぎない。しかし，未補修数が累積的に増加するという悪循環を発生させないためには，以上で分析したような分岐点をより詳細に検討したうえで，事務所の人員体制の強化，あるいはそれに見合う生産性の向上を図ることにより，図-2.9に示したような「未補修変状数の定常化サイクル」を維持していく努力が求められる。

3.6 結言

本章では，高速道路インフラにおける未補修変状数が経年的に増加している原因に対して，個別変状の多様性と時間的発生過程の複雑性の面，および実現場における構造物マネジメントの面の2つの側面から分析を実施した。具体的には，高速道路構造物全体の個別の変状の「量的」側面に焦点を当て，変状発生の時間的発生分布，変状間の相互作用，補修行為と変状発生の相互作用を分析するとともに，補修判断の意思決定や補修規模を決定付ける要因を分析した。実証分析の結

果、得られた知見は以下の通りである。まず、高速道路構造物に生じる個別変状全体に着目すると、変状発生数は有限であり、概ね30年経過時点を境に年間発生量は収束に転じることがわかった。次に、変状種別ごとの視点で見ると、漏水→剥離という発生順序が明瞭に表れ、両者の間に概ね15年程度のタイムラグ（補修までの時間猶予）が存在することが認識できた。さらに、変状は独立事象として発生するのではなく、漏水変状がその後の変状発生に大きな影響を及ぼしていることがわかった。したがって、漏水に対する的確な補修を優先的に実施することにより、その後の変状発生を抑制することができることとなる。最後に、未補修変状数とそれを踏まえて計画される補修規模との間には弱いながらも負の関係性があり、未補修変状数を管理延長100km当り6,000程度以下に抑えることが発散させないために必要となることがわかった。

当然のことながら、以上の知見は、分析対象として取り挙げた高速道路区間においてのみ成立する事項である。また、分析に用いたデータ数が限られており、分析モデルの精緻化を図ることにより、分析結果の信頼性を向上させることが必要である。このような限られたデータに基づいた知見ではあるが、本研究により高速道路における道路構造物マネジメントが抱える問題点の一端を明らかにし得たものと考えられる。しかしながら、統計的手法だけでは将来を論じることは難しく、確率的な将来の危険度や変状累積の最終形態（潜在変状数）も把握できないことから、確率モデルを用いた詳細な分析方法、人為行為の影響度のより適正な評価手法について、第4章、第5章においてさらなる分析を加えることとする。

参考文献

- 1) 道路構造物の今後の管理・更新等のあり方に関する検討委員会：道路構造物の今後の管理・更新等のあり方提言，2003.
- 2) 道路橋の予防保全に向けた有識者会議：道路橋の予防保全に向けた提言，2008.
- 3) 社会資本整備審議会道路分科会：道路の老朽化対策の本格実施に関する提言，2014.
- 4) NEXCO 3 会社：高速道路資産の長期保全及び更新のあり方に関する技術検討委員会報告書，2014.
- 5) NEXCO 3 会社：点検実施基準及び資格に関する検討委員会報告書，2015.
- 6) 土木学会：コンクリート標準示方書 維持管理編，2013.
- 7) 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.
- 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キング，土木学会論文集 A，Vol.64，No.4，pp.857-874，2008.
- 9) 松井繁之：移動荷重を受ける道路橋 RC 床版の疲労強度と水の影響について，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.9，No.2，pp.627-632，1987.
- 10) 星野崇宏：調査観察データの統計科学，岩波書店，2009.

- 11) 小林潔司，田村敬一，藤木修：国際標準型アセットマネジメントの方法，日刊建設工業新聞社，2016.
- 12) 小林潔司：土木工学における実践的研究：課題と方法，土木技術者実践論文集，Vol.1，pp.143-155，2010.
- 13) 三上真寛：取引費用経済学の再検討-ウィリアムソンとコースの比較から-，進化経済学論集 14，pp.997-1013，2010.
- 14) 広瀬弘忠：人はなぜ逃げおくれるのか，災害の心理学，集英社，2004.

第4章 変状数の有限性を考慮した変状発生モデル

4.1 緒言

本章では、変状発生の実態について論じることとする。そこで、現実的に見られる変状発生特性における有限性の可能性に着目し、将来の有限性を仮定した上で変状発生過程を確率的に取り扱うことにより将来予測と推計を行い、その結果を現在にフィードバックすることにより、効率的で合理的な構造物マネジメントを行うために有益な情報を、変状データそのものから取り出す方法論を提示する。

第1章で示したように、近年、高速道路構造物の経年劣化が顕著になってきている一方で、それに対する補修が適切に行われているようにはない現実がある。限られた人員、事業費の中での的確な補修を実施するためには、定期点検の実施を通して変状の特性を知ることが不可欠である。通常、補修の実施には人員や事業費などの制約が存在するため、将来において変状がその実施可能量を超えて発生しないように管理していく必要がある。補修予算や人員の平準化を達成するためには、変状発生数と補修箇所数をバランスさせ、また変状の新規発生を抑制し、未補修の変状数が継続的に増加することがないように構造物の健全性をある一定の状態に維持させていくことが必要となる。そのためには、変状の発生数を予測し、現在の補修レベルで将来においても安全・安心なサービスを提供することができるとともに、現在から将来にわたって変状発生を適切にコントロールするための構造物マネジメントの方法を開発することが求められる。

土木構造物に発生する変状は、ひび割れ・漏水・浮き・剥離など数多くの形態が存在する。構造物により変状の発生特性が異なる。また、変状の形態により、その発生の時間特性が異なる。これら個別の変状を未補修のまま経過観察し続けていると、その変状が原因となり新たな変状が発生し、変状の規模を拡大させる可能性がある。限られた人員や予算の下で長期間にわたって構造物を効果的にマネジメントするためには、構造物全体にわたって出現する変状とその累積数の時間分布を可能な限りの確に把握することが必要である。そのうえで、時間とともに発生パターンが異なる変状群に対して効果的に対処していくことが求められる。

以上の問題意識のもとで、本章では、将来時点における変状の発生数の時間的分布を予測することを目的とした変状数発生確率モデルを提案する。具体的には、土木構造物において変状発生の可能性がある箇所を潜在的な変状箇所と定義する。その上で、潜在的変状数の確率分布を潜在的変状数分布モデルとして記述する。また、潜在的な変状箇所が経年時間に応じて変状として顕在化する確率を潜在的変状顕在化確率モデルを用いて表現する。その上で、これら2つのモデルを合成した混合確率モデルとして変状数発生確率モデルを定式化する。本モデルを用いることにより、変状形態ごとに経年時間と変状の発生数の関係を分析することが可能となる。以下、4.2で本研究の基本的な考え方を述べる。4.3で変状数発生確率モデルを定式化する。最後に、4.4で実際の高速度道路構造物を対象として、モデルの適用可能性について分析する。

4.2 本章の基本的な考え方

4.2.1 既往研究の概要

土木構造物の劣化過程を予測するモデルに関して、力学的劣化予測モデル^{2),3)}、統計的劣化予測モデル^{4),5)}ともに既に多くの研究の蓄積がある。本章では、点検

記録を利用する統計的な劣化予測モデルに焦点を当て、土木構造物に生じる変状の規模を予測する変状数発生確率モデルを提案する。

将来時点において発生する変状の数を予測する手法として、ポアソン過程に代表される計数過程を用いたモデル化があげられる^{6),7)}。計数過程では、一定の期間内に生じた事象の回数を数え上げることによって事象の発生頻度を計算し、事象の分布関数を特定化する。土木構造物への適用例として、貝戸等⁸⁾は道路区間に発生する路上障害物が計数過程の1つである混合ポアソン過程に従うと仮定して路上障害物の発生過程をモデル化している。計数過程においては、 n 回目の事象と $n+1$ 回目の事象が互いに時間的に独立して発生することを仮定している。しかし、本研究で対象とする土木構造物は、時間とともに構造物全体の劣化が進展し、変状の発生を数えている領域内において一律に変状の発生確率が増加するという特徴を持っている。したがって、 n 個目の変状発生と $n+1$ 個目の変状発生を互いに独立事象と考えるような計数過程としてモデル化するのではなく、複数の潜在的な変状事象が時間を通じて生起するようなモデル化が必要となる。

ある対象とする事象の発生確率と経過時間の関係を分析するモデルとして、ハザードモデルがある。ハザードモデルを用いた生存時間解析に関しては信頼性解析など多くの分野で適用事例があり研究成果も豊富である。ハザードモデルの推計方法に関しても研究成果が蓄積されており、Lancaster等で体系化されている^{9),10)}。土木構造物に対するハザードモデルの適用事例として、青木等⁴⁾は、トンネル照明ランプの故障が発生するまでの時間をワイブル分布によって表現したワイブル劣化ハザードモデルを提案し、将来時点におけるトンネル照明ランプの故障数を予測した。津田等⁵⁾は、2つの状態間の時間的推移を表現するハザードモデルを拡張し、2つ以上の任意の状態間の時間的推移を表現するマルコフ劣化ハザードモデルを開発した。マルコフ劣化ハザードモデルの開発により、各状態の任意の

将来時点における状態分布を表現することが可能となった。その他にも、ハザードモデルを土木構造物に適用した事例は数多く蓄積されている¹¹⁾⁻²¹⁾。ハザードモデルを用いた解析の方法論は既に確立されており、点検データに介在する「打ち切り・切断」²²⁾といった問題を考慮したモデル推計を実施できることが利点の1つといえる。しかしながら、ハザードモデルはある特定の変状が発生するまでの時間分布を表現することを目的としており、ある構造物に発生する総変状数の時間分布を表現するものではない。

本章では、ある特定の変状に着目し、土木構造物において着目する変状の累積総発生数の時間分布を予測するための変状数発生確率モデルを提案する。そのために、本論文では、対象とする土木構造物において変状の発生する可能性のある箇所の数（以下、潜在の変状数と呼ぶ）を確率変数と考え、潜在の変状数の確率分布を表す潜在の変状数分布モデルを定式化する。さらに、それぞれの潜在の変状箇所において変状が顕在化するまでの経過時間分布をハザードモデル（以下、潜在の変状顕在化確率モデルと呼ぶ）を用いて表現する。そのうえで、潜在の変状数分布モデルと潜在の変状顕在化確率モデルを合成することにより、変状の累積総発生数の時間的変化を表現する変状数発生確率モデルを提案する。本モデルにより、潜在の変状箇所数の確率分布を推定でき、同時に時間経過により変状数がどの様に推移していくかを分析することが可能となる。混合確率モデルを土木構造物に対して適用した事例^{14),19)-21)}はいくつかあるが、本論文のように、母集団の大きさを確率変数とした混合確率モデルを用いた事例は、筆者の知る限り存在しない。

4.2.2 潜在の変状の有限母集団仮説

本論文で提案する変状数発生確率モデルでは、潜在の変状箇所之母集団の大きさを確率変数と考えた母集団過程²³⁾を考える。すなわち、ある構造物において発生する潜在の変状数は未知であるが、その数は有限であると考え。本論文では、このような潜在の変状数を有限と考える仮説を潜在の変状の有限母集団仮説と呼ぶ。少なくとも筆者の知る限り、これまでの土木構造物マネジメントの現場において、潜在の変状の有限母集団仮説が明示的に考慮されることはなかった。土木構造物マネジメントの現場では、構造物の供用開始後、時間の経過とともに変状の数が飛躍的に増加してきたため、潜在の変状箇所は無限に存在し、将来時点で対応すべき変状数が累積的・継続的に増加するのではないかとの懸念が幅広く存在してきた。しかしながら、第3章で示したように、実際の現地の状況を表す点検記録に基づけば、変状の新規発生数が減少に転じる時点が存在している事例が見受けられ²⁴⁾、潜在の変状の有限母集団仮説を示唆している。これは、構造物の特性として変状が発生しやすい箇所が予め決まっており、変状が発生しない箇所は供用年からの経過時間に関わらず発生しないこと、あるいは、変状の発生箇所は弱点部（初期欠陥）として生来的に存在しており、そこに変状が集中することにより他の部分の健全性が維持され続けること等の可能性が潜在の変状箇所が有限となる理由として考えられる。構造物に存在する潜在の変状数が有限であるという考え方は、現時点ではあくまでも現実のデータを通じて検証すべき仮説にすぎない。仮説の検証には変状の新規発生数が最大となる時点が存在するか否かを分析すればよい。有限母集団仮説が成立する場合、潜在の変状数の有限性を仮定することによりはじめて、将来時点における変状発生数を確率的・定量的に取り扱え、把握できるようになり、構造物マネジメントの将来形を客観的に論じることができるようになる。

本章では、これまでに生じた変状箇所に関する点検データに基づいて変状数発生確率モデルを推計し、潜在変状の有限母集団仮説を検証していく。有限母集団仮説が成立する場合、先述したように変状の有限性を考慮した構造物マネジメントを考えることができる。すなわち、将来時点における変状発生数を定量的に把握し、必要となる補修量に応じた人員・費用の確保、あるいは変状の発生を抑制できるような対策を実施していくことができる。さらには、変状形態間の因果関係を特定化し、検討時点において重点的に監視すべき変状形態を把握して対策を講じるなどのより効率的な維持管理を実施していくことも可能となる。例えば、一般的に漏水は構造物の供用開始後、初期の段階で発生し、その漏水が原因となり剥離・剥落へ繋がるという因果関係が想定できる。近年、劣化が著しくなっているという感覚は、特にコンクリート剥離の変状の多発によって印象付けられているように感じられる。したがって、この因果関係の内容を実証的に確認できれば、漏水対策を重視する維持管理へとシフトすることにより、特に現状まだ比較的健全な構造物に対しての、より効率的で効果的な構造物マネジメントを実施することができる。以上示したように、有限母集団仮説は確率的、定量的な知見に基づく構造物マネジメントへの発展に不可欠な仮説であると考えられる。

4.3 変状数発生確率モデル

4.3.1 モデル化の前提

管理者が、供用時点が異なる K 個の構造物を管理していると考えられる。これらはある特定の種類の構造物であるが、それが設置されている環境や施工上の特性により、構造物の劣化特性が異なる。これらの構造物には、多様な損傷や変状（以下では、変状と呼ぶ）が発生するが、以下では、議論の見通しをよくするために、ある特定の種類の變状に着目する。

供用開始後のある時点において、管理者は点検により、構造物に発生する変状をモニタリングする。各構造物には、供用期間中に顕在化する潜在的な変状が存在する。このような潜在的変状の数は有限であると仮定する。しかし、潜在的変状の個数は、観測不可能である。このような潜在的変状の集合を、以下潜在変状集合と呼ぶこととする。時間の経過に伴って、潜在変状集合の中から、ある特定の変状が顕在化していき、目視点検により、顕在化した変状が観測される。したがって、時間の経過に伴い、点検で発見された累積変状数は単調に増加する。

4.3.2 状態空間クラスの定式化

ある構造物 k ($k = 1, \dots, K$) において生起する潜在的な変状数を \hat{n}_k と表す。変状数の真の値 \hat{n}_k の値は確定的であるが、管理者はその値を観測できない。したがって、確率変数 n_k を用いて潜在的変状数を表現する。ここで、特定の構造物 k に着目して議論を進めることとし、添え字 k を当面の間省略する。構造物の潜在的変状数 n を与件としたとき、当該の構造物において生起する潜在的変状の添え字の集合を $A^n = \{1, \dots, n\}$ と表す。潜在的変状数 n は確率変数であり、 n の実現値が変われば潜在変状集合 A^n も変化する。潜在変状集合 A^n に含まれる潜在的変状の添え字を $a \in A^n$ で表す。ある時点の目視点検において観測される変状 $a \in A^n$ の状態を、状態変数 $s_a \in \Delta_a$ ($a \in A^n$) により記述する。ここに、 s_a は潜在的変状 $a \in A^n$ が目視点検時点までに顕在化したかどうかを表す 0-1 変数であり、

$$s_a = \begin{cases} 0 & \text{顕在化していない} \\ 1 & \text{顕在化した} \end{cases} \quad (4.1)$$

と定義される。 Δ_a は、変状 a の状態空間である。ここで、 n を与件とした潜在的変状の条件付き状態空間 Δ^n を、変状 $a \in A^n$ の個別状態空間 Δ_a の直積空間

$$\Delta^n = \prod_{a \in A^n} \Delta_a \quad (4.2)$$

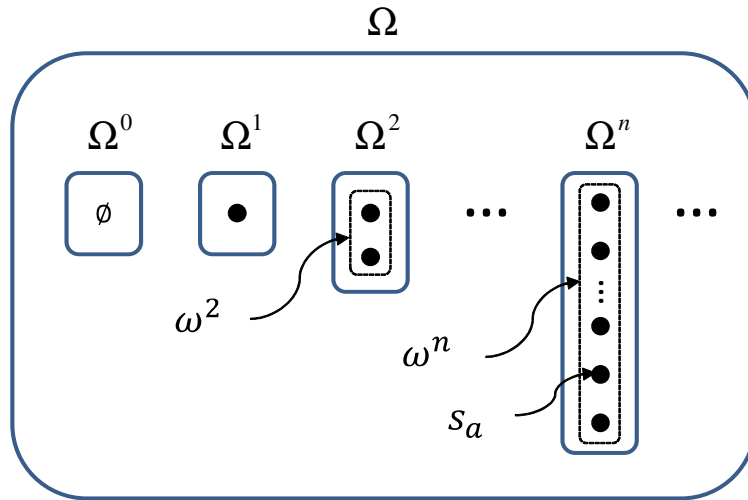


図 - 4.1 状態空間クラスの概念図

で表す。このとき、条件付き状態空間 Δ^n 上で定義される状態変数 ω^n を

$$\omega^n = \{s_1, \dots, s_n\} \quad (4.3)$$

と記述する。状態空間 Δ^n を構成する個別状態空間 $\Delta_a (a \in A^n)$ ごとに $s_a = 0, s_a = 1$ という2通りの状態を定義できる。条件付き状態空間 Δ^n で定義される状態変数は n 個の個別状態の組として定義されるため、合計 2^n 個の状態変数が存在する。また、状態空間 Δ^n 上で定義される状態変数 ω^n の集合を Ω^n と表す。以上の議論では n を与件と考えていたが、つぎに n を確率変数と考える。このとき、潜在的変状の状態空間の集合（以下、状態空間クラスと呼ぶ）を

$$\Omega = \bigcup_{n \in \mathbb{Z}_+} \Omega^n \quad (4.4)$$

と表す。 \mathbb{Z}_+ は非負整数集合である。 n が既知の時、 Ω^n は潜在的変状数を n とする有限状態空間となる。 n が観測不可能であるため、潜在的変状の状態空間 Ω^n のクラス Ω を考え、その要素を $\omega \in \Omega$ と表現する。図-4.1 に状態空間クラスの概念図を示している。図中 $\Omega^n (n = 1, \dots, n, \dots)$ は潜在的変状数が n となるような状態

空間を表す。状態空間 Ω^0 は潜在の変状数が 0 である場合であり、null 要素 \emptyset のみで構成される。状態空間クラスは、すべての個別状態空間に含まれるすべての要素の集合として定義される。さらに、状態空間クラス Ω 上で定義される確率関数 $\pi: \Omega \rightarrow [0, 1]$ を考える。関数 $\pi(\omega)$ は状態空間クラス Ω の中から、その要素 ω が実現する確率を表す。関数 π の無名性 (s_a の任意の置換に対する不変性) を仮定する。このとき、 (π, Ω) は確率空間を形成する。すなわち、状態空間クラスの中から、自然によりある特定の状態空間に含まれる状態 ω が標本として選択され、状態 ω により記述されるような変状が顕在化する²³⁾。

4.3.3 潜在の変状数分布モデル

再び、潜在の変状数 n を与件とし、供用開始後のある時点において目視点検が実施された場合を考える。状態空間 Ω^n から抽出した標本 $\omega^n = \{s_1, \dots, s_n\}$ に対して、

$$m(\omega^n) = |\{a : s_a = 1, a \in A, \omega^n = \{s_1, \dots, s_n\}\}| \quad (4.5)$$

を定義する。記号 $|\cdot|$ は集合の要素数を表す。 $m(\omega^n)$ は状態空間 Ω^n から、標本 $\omega^n = \{s_1, \dots, s_n\}$ が抽出されたとき、標本の中に含まれる顕在化された変状の個数を表す。状態空間クラス (π, Ω) に含まれる任意の要素 $\omega = \omega^n$ に対して定義される関数 $\pi(\omega^n)$ が以下の条件を満足すると仮定する。

$$\pi(\omega^n) = \zeta(n) \prod_{a=1}^n \rho(s_a) \quad (4.6)$$

ただし、 $\pi(\omega^n) = \text{prob}(\omega^n \in \Omega)$. $\rho(s_a) = \text{prob}(s_a \in \Delta_a)$ である。また、 $\zeta(n) = \sum_{\omega^n \in \Omega^n} \pi(\omega^n)$ は、状態空間 Ω^n の生起確率を意味する。条件 (4.6) は、1) 各時点における変状の顕在化する確率がそれぞれ独立かつ一定であり、2) 変状の顕在化する確率が潜在の変状数に依存しないことを意味する。図-4.2 における状態空間 Ω^n に着目する。 Ω^n の各要素は潜在の変状数を n とする状態変数ベクトルを意味している。

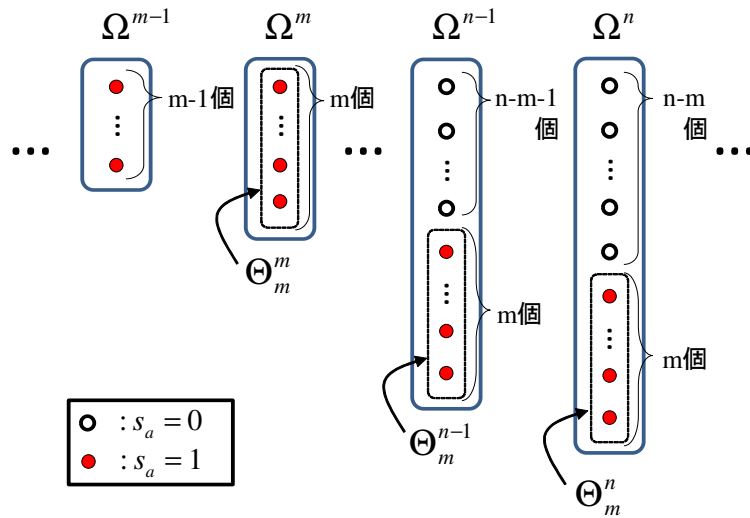


図 - 4.2 顕在化した変状数が m となる状態集合

これらの各要素に対して，顕在化している変状数を式(4.5)を用いて定義することができる．同図には， $m(\omega^n) = m$ となるような状態の集合 Θ_m^n を示している．このように，状態空間 Ω^n において， m 個の変状が顕在化しているような状態変数の集合 Θ_m^n を

$$\Theta_m^n = \{\omega^n \in \Omega^n | m(\omega^n) = m\} \quad (4.7)$$

と定義する．変状の無名性を仮定すれば，集合 Θ_m^n に含まれる状態の数は組み合わせにより ${}_n C_m$ 個存在することが理解できる．

一方，潜在変状数は観測不可能であり，管理者には，対象とする構造物に対してどの状態空間 Ω^n が生起しているかを特定できない．図-4.2において，状態空間 Ω^n に隣接する状態空間 Ω^{n-1} に着目する．状態空間 Ω^{n-1} に対しても，顕在化した変状数が m となるような状態の集合 Θ_m^{n-1} を定義できる．ただし，状態空間 $\Omega^0, \dots, \Omega^{m-1}$ に対しては，状態集合 Θ_m^n を定義できない．いま，状態空間クラスに含まれる状態 $\omega \in \Omega$ に関して，各状態が生起する確率関数 π が与えられたと考え

る。さらに、潜在の変状数が n であり、そのうち m 個の変状が顕在化する無条件確率 P_m^n と顕在化した変状数が m となる無条件確率 P_m は、それぞれ

$$P_m^n = \sum_{\omega^n \in \Theta_m^n} \pi(\omega^n) \quad (4.8-a)$$

$$P_m = \sum_{n=m}^{\infty} P_m^n \quad (4.8-b)$$

と定義できる。さらに、潜在の変状が顕在化している確率（変状発生確率と呼ぶ）が、すべての変状に対して同一であり $\rho(s_a = 1) = P$ と表せると仮定する。同様に、顕在化しない確率は $\rho(s_a = 0) = 1 - P$ と表される。このとき、条件 (4.6) を考慮すれば、式 (4.8-a) を

$$P_m^n = \zeta(n) \sum_{\omega^n \in \Theta_m^n} \prod_{a=1}^n \rho(s_a) = \zeta(n) {}_n C_m (P)^m (1 - P)^{n-m} \quad (4.9)$$

と書き換えることができる。 $\zeta(n)$ は潜在の変状数 n が生起する確率である。対象とする構造物が、無限に多くの同質的な基本単位で構成されていると考え、各基本単位において変状が発生する確率が一定であれば、潜在の変状数 n の確率分布をポワソン分布により表現できる (付録 4.A 参照)。すなわち、潜在の変状数が n となる確率 $\zeta(n)$ は

$$\zeta(n) = \frac{(\lambda S)^n}{n!} \exp(-\lambda S) \quad (4.10)$$

と表すことができる。ただし S は構造物の面積である。式 (4.10) は、対象とする構造物に介在する潜在の変状数の確率分布を表しており、本論文では潜在の変状数分布モデルと呼ぶこととする。

したがって、式 (4.8-b) より、 m 個の変状が顕在化する無条件確率（変状数生起確率と呼ぶ）はそれぞれ、

$$P_m = \sum_{n=m}^{\infty} \zeta(n) {}_n C_m (P)^m (1 - P)^{n-m} \quad (4.11)$$

と表される。若干の計算により（付録 4.B 参照）

$$P_m = \frac{(\lambda S P)^m}{m!} \exp(-\lambda S P) \quad (4.12)$$

となる。また、式 (4.12) は単位期間当たりの期待発生数を $\lambda S P$ とするポアソン分布に従うため、変状発生数 m の期待値と分散が等しく

$$E[P_m] = \lambda S P \quad (4.13-a)$$

$$V[P_m] = \lambda S P \quad (4.13-b)$$

と表すことができる。ただし、 $E[\cdot]$ は期待値を、 $V[\cdot]$ は分散を表す。

4.3.4 潜在の変状顕在化確率モデル

式 (4.12) において、確率 P は、点検時点までに潜在の変状が顕在化する確率である。点検時点において、供用開始時点から時間 τ が経過していると考え、供用時点から変状が顕在化するまでの経過時間（以下、寿命と呼ぶ）を確率変数 z で表し、確率密度関数 $f(z)$ 、分布関数（累積寿命確率） $F(z)$ に従って分布すると仮定する。ただし、寿命 z の定義域は $[0, \infty)$ である。いま、供用開始時点から時間 z が経過した時点で、着目した潜在の変状が顕在化しない確率（以下、生存確率と呼ぶ） $\tilde{F}(z)$ は、全事象確率 1 から経過時間 z までに変状が顕在化する累積寿命確率 $F(z)$ を差し引いた値

$$\tilde{F}(z) = 1 - F(z) \quad (4.14)$$

により定義できる。ここで、供用開始時点から期間 z まで潜在の変状が顕在化せず、かつ期間 $[z, z + \Delta z]$ 中にはじめて変状が顕在化する確率は、

$$\chi(z)\Delta z = \frac{f(z)\Delta z}{\tilde{F}(z)} \quad (4.15)$$

と表せる。以下、確率密度 $\chi(z)$ をハザード関数と呼ぶ。式 (4.14) の両辺を z に関して微分することにより、

$$\frac{d\tilde{F}(z)}{dz} = -f(z) \quad (4.16)$$

を得る。このとき、式 (4.15) は

$$\chi(z) = \frac{f(z)}{\tilde{F}(z)} = \frac{d}{dz} (-\log \tilde{F}(z)) \quad (4.17)$$

と変形できる。ここで、 $\tilde{F}(0) = 1 - F(0) = 1$ を考慮し、式 (4.17) を積分すれば、

$$\int_0^z \chi(u) du = -\log \tilde{F}(z) \quad (4.18)$$

を得る。したがって、ハザード関数 $\chi(u)$ を用いれば、期間 z にわたり変状が顕在化しない確率 $\tilde{F}(z)$ は、

$$\tilde{F}(z) = \exp \left[- \int_0^z \chi(u) du \right] \quad (4.19)$$

と表される。ハザード関数としてワイブル劣化ハザード関数

$$\chi(z) = \mu \alpha z^{\alpha-1} \quad (4.20)$$

を考える。ただし、 α は加速度パラメータであり、変状顕在化確率の時間依存性を表す。一方、 μ は変状の顕在化に影響を及ぼすパラメータである。ワイブル劣化ハザード関数を用いた場合、寿命に関する確率密度関数 $f(z)$ 、および生存確率 $\tilde{F}(z)$ は、それぞれ

$$f(z) = \mu \alpha z^{\alpha-1} \exp(-\mu z^\alpha) \quad (4.21-a)$$

$$\tilde{F}(z) = \exp(-\mu z^\alpha) \quad (4.21-b)$$

となる。

いま、構造物が供用されたのちに時間 τ が経過した時点を考える。このとき、着目する構造物の任意の潜在変状が経過時間 τ までに顕在化している変状発生確

率 $P(\tau)$ は

$$P(\tau) = 1 - \tilde{F}(\tau) = 1 - \exp(-\mu\tau^\alpha) \quad (4.22)$$

と表せる. 式 (4.22) は, 個別構造物に介在する潜在の変状が, 供用を開始したのちに時間 τ が経過するまでに顕在化する確率を表しており, 本論文では潜在の変状顕在化確率モデルと呼ぶ. このとき, 潜在の変状数が式 (4.10) に示す潜在の変状数分布モデルで表現されるとき, 構造物の供用後, 経過時間 τ を経るまでに m 個の変状が顕在化する確率 $P_m(\tau)$ は, 式 (4.12) を用いて

$$P_m(\tau) = \frac{(\lambda S \{1 - \tilde{F}(\tau)\})^m}{m!} \exp(-\lambda S \{1 - \tilde{F}(\tau)\}) \quad (4.23)$$

と表すことができる. 本論文では, 式 (4.23) を変状数発生確率モデルと呼ぶ.

4.3.5 尤度関数

以上では, ある特定の構造物に着目し, 個別構造物を表す添え字 k を省略して議論した. ここでは, 構造物を特定化する添え字 k を再び考える. いま, 土木構造物 k ($k = 1, \dots, K$) を対象として目視点検が行われ, 目視点検により発見された累積変状数 \bar{m}_k , 構造物の供用時点から目視点検までの供用時間 $\bar{\tau}_k$, 構造物の面積 \bar{S}_k に関するデータが得られたと考える. 記号「 $\bar{}$ 」は観測値であることを意味する. 本研究で提案する変状数発生確率モデルは, 個別構造物に含まれる潜在の変状数の確率分布を表す潜在の変状数分布モデル (式 (4.10)) と, 個別構造物に存在する潜在の変状が顕在化するまでの時間分布を表す潜在の変状顕在化確率モデル (式 (4.22)) により構成される. これら 2 つの確率モデルには, 確率特性を表す λ, μ, α という未知パラメータが含まれる. これら 3 つのパラメータは, いずれも個別構造物の特性や使用環境によって影響を受けると考えることができる. このうち, λ は個別構造物に含まれる潜在の変状数の多寡を表すパラメータ, μ, α は潜在の変

状が顕在化するまでの時間分布を規定するパラメータである。しかし、ある時点で実施された点検において観察される累積変状数の散らばりが、各構造物の潜在の変状数の多寡によるものか、あるいは構造物ごとの潜在的変状の顕在化確率の違いによるものかを識別できないという識別性問題が発生する。そこで、本論文では、構造物の特性や使用環境による潜在的変状数の多寡が、構造物ごとの潜在的変状の顕在化確率の違いの効果を卓越していると考え、潜在的変状数分布モデルの確率パラメータ λ のみが個別構造物の特性や使用環境の影響を受けると考える。個別構造物の特性や使用環境の違いが確率パラメータ λ と μ の双方に及ぼす影響を分析するためには、時間軸にわたった数多くの時点における点検結果をパネルデータとして蓄積し、時間の経過とともに累積変状数が増加していく過程を直接モデル化することが必要となる。

いま、構造物 $k(k = 1, \dots, K)$ に含まれる潜在的変状数に影響を表す特性変数ベクトル $\bar{\mathbf{y}}_k = (\bar{y}_{k,0}, \dots, \bar{y}_{k,L})$ を用いて潜在的変状数分布モデルのパラメータ λ_k を

$$\lambda_k = \bar{\mathbf{y}}_k \boldsymbol{\gamma}' \quad (4.24)$$

と表す。ただし、 $\boldsymbol{\gamma} = (\gamma_0, \dots, \gamma_L)$ は未知パラメータベクトルである。ただし $\bar{y}_{k,0} = 1$ であり定数項を表す。このとき、いま、構造物 k に対して得られる観測値ベクトルを $\bar{\boldsymbol{\xi}}_k = \{\bar{m}_k, \bar{\tau}_k, \bar{S}_k, \bar{\mathbf{y}}_k\}$ とし、すべての構造物に対して観測値ベクトル $\bar{\boldsymbol{\Xi}} = \{\bar{\boldsymbol{\xi}}_1, \dots, \bar{\boldsymbol{\xi}}_K\}$ が得られたと考える。本モデルにおいて推定すべき未知パラメータベクトルを $\boldsymbol{\theta} = (\boldsymbol{\gamma}, \mu, \alpha)$ と表す。ただし、 $\boldsymbol{\gamma}$ は、式(4.24)に示す係数ベクトル、 μ, α は式(4.20)に示すワイブルハザードモデルのパラメータである。このとき、観測値ベクトルが生起する条件付き尤度 $\ell(\boldsymbol{\theta}|\bar{\boldsymbol{\Xi}})$ は

$$\ell(\boldsymbol{\theta}|\bar{\boldsymbol{\Xi}}) = \prod_{k=1}^K \frac{(\bar{\mathbf{y}}_k \boldsymbol{\gamma}' \bar{S}_k)^{\bar{m}_k}}{\bar{m}_k!} \exp(-\bar{\mathbf{y}}_k \boldsymbol{\gamma}' \bar{S}_k) \{1 - \tilde{F}(\bar{\tau}_k)\}^{\bar{m}_k} \cdot \exp\{\bar{\mathbf{y}}_k \boldsymbol{\gamma}' \bar{S}_k \tilde{F}(\bar{\tau}_k)\} \quad (4.25)$$

と表される。ただし、 $\tilde{F}(\bar{\tau}_k) = \exp(-\mu \bar{\tau}_k^\alpha)$ である。また、定数項を無視すれば、対

数尤度関数は

$$\begin{aligned} \mathcal{L}(\boldsymbol{\theta}|\bar{\mathbf{E}}) &= \sum_{k=1}^K \bar{m}_k \{ \ln(\bar{\mathbf{y}}_k \boldsymbol{\gamma}' \bar{\mathbf{S}}_k) + \ln\{1 - \exp(-\mu \bar{\tau}_k^\alpha)\} - \bar{\mathbf{y}}_k \boldsymbol{\gamma}' \bar{\mathbf{S}}_k + \bar{\mathbf{y}}_k \boldsymbol{\gamma}' \bar{\mathbf{S}}_k \exp(-\mu \bar{\tau}_k^\alpha) \} \end{aligned} \quad (4.26)$$

と表される。対数尤度関数 (4.26) を最大にするようなパラメータ値 $\boldsymbol{\theta}$ の最尤推定量は、

$$\frac{\partial \mathcal{L}(\boldsymbol{\theta}|\bar{\mathbf{E}})}{\partial \boldsymbol{\theta}} = 0 \quad (4.27)$$

を同時に満足するような $\hat{\boldsymbol{\theta}} = (\hat{\boldsymbol{\gamma}}, \hat{\mu}, \hat{\alpha})$ として与えられる。パラメータの漸近的な共分散行列の推定値 $\hat{\boldsymbol{\Sigma}}(\hat{\boldsymbol{\theta}})$ は、

$$\hat{\boldsymbol{\Sigma}}(\hat{\boldsymbol{\theta}}) = \left[\frac{\partial^2 \mathcal{L}(\boldsymbol{\theta}|\bar{\mathbf{E}})}{\partial \boldsymbol{\theta} \partial \boldsymbol{\theta}'} \right]^{-1} \quad (4.28)$$

と表すことができる。ただし、上式の右辺の逆行列は $\partial^2 \mathcal{L}(\boldsymbol{\theta}|\bar{\mathbf{E}}) / \partial \theta_i \partial \theta_j$ を要素とする $(L+2) \times (L+2)$ 次の Fisher 情報行列²⁵⁾ の逆行列である。パラメータの最尤推定量は、 $(L+2)$ 次元の非線形連立方程式 (4.27) を解くことにより得られる。本研究では、ニュートン・ラフソン法²⁶⁾ により最尤推定量を求めることとした。最尤推定量 $\hat{\boldsymbol{\theta}}$ を求めれば、共分散行列の推定量 $\hat{\boldsymbol{\Sigma}}(\hat{\boldsymbol{\theta}})$ を用いて t 検定統計量を推定できる。

4.4 適用事例

4.4.1 適用事例の概要

本章では、NEXCO 西日本が管理するある高速道路区間を実証分析の対象としてとりあげる。対象とする道路延長は 1,054km（うち橋梁延長 259km）である。対象となる橋梁数は 1,114 橋であり、5 年に 1 回の頻度で詳細点検が実施されている。点検結果は、小さな変状 1 つ 1 つを網羅的に数え上げ判定する個別判定と、一連の構造物を 1 つの単位で主に構造的安全面から評価する健全度評価が実施され、その結果がデータとして点検補修管理システム（以下、点検システム）内に記録、

表 - 4.1 変状特性

	漏水系	コンクリート剥離系
対象橋梁数	869 橋	830 橋
最大供用年数	42 年	
平均供用年数	26.4 年	27.2 年
変状発生数	95,611 個	78,595 個
サンプルサイズ	1840	1876
橋面積の最大値	42878 (m ²)	42878 (m ²)
橋面積の最小値	67 (m ²)	86 (m ²)
橋面積の平均値	3540.0 (m ²)	3596.7 (m ²)

保存されている。現行の点検システムは平成 17 年から運用されている。本論文では、点検システムの運用開始時点以降において変状が発生している橋梁を分析対象とする。なお、点検はすべての橋梁を対象として網羅的に実施されており、点検時点においてそれぞれの橋梁における累積変状発生数は的確に把握されている。

橋梁には多種多様な変状が発生するが、その大部分は漏水、浮き、剥離という変状で構成される。全ての種類の変状に対して、それぞれ個別にモデルを適用すると、データが過度に細分化され現実的ではない。本研究では橋梁に生じる変状を特徴に応じて大きく、漏水系、コンクリート剥離系、その他（外力系、初期欠陥系、下部構造特有の変状、補修済箇所損傷、凍害系）の 3 種類に分類するとともに、全変状の 90% ほどを占める漏水系およびコンクリート剥離系（以下、剥離系）に絞って分析を実施した。表-4.1 に、分析対象とした橋梁で発生した変状の特性を整理している。同表に示すように、対象とする橋梁のうち 869 橋に漏水系変状が、830 橋において剥離系変状が発生している。分析対象とした橋梁の中で、もっとも古い橋梁は供用開始後 42 年が経過している。さらに、漏水系変状が発生している橋梁の平均供用年数は 26.4 年、剥離系変状が発生している橋梁は 27.2 年であった。また、現在までに 95,611 個の漏水系変状と、78,595 個の剥離系変状が

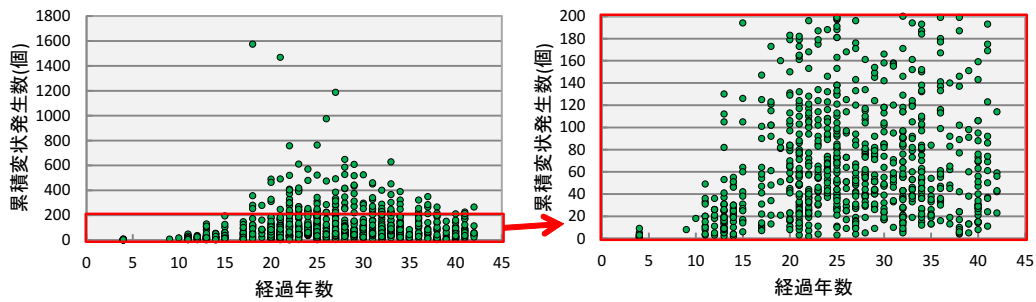


図 - 4.3 漏水系の累積変状発生数と経過年数の関係 (左：全体図，右：拡大図)

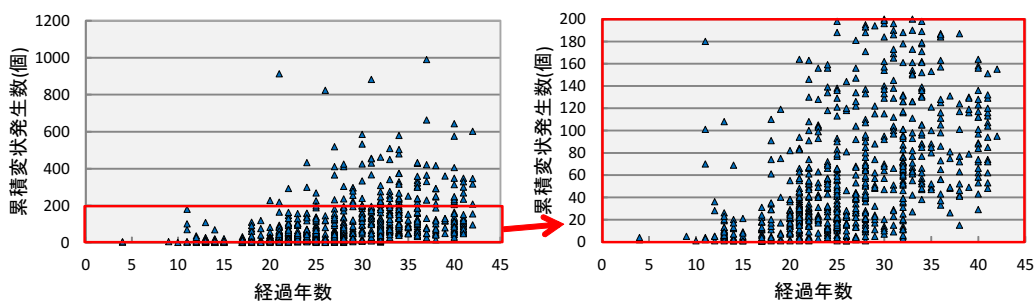


図 - 4.4 剥離系の累積変状発生数と経過年数の関係 (左：全体図，右：拡大図)

発生している。

以上のデータベースに基づいて、1つの橋梁を1つの構造物として、目視点検により変状が発見される供用時間 τ 、当該時点までの累積変状発生数 m 、およびそれぞれの橋梁特性に関するデータを整理し、モデル推計のためのサンプルを抽出したところ、漏水系変状ではサンプルサイズが1840、剥離系変状ではサンプルサイズが1876となった。なお、点検システム運用開始後2度以上点検が実施された場合、それぞれの点検時点におけるデータを異なるサンプルとして認識しているため、サンプルサイズが分析対象とする橋梁数よりも大きくなっている。また、抽出したサンプルの橋面積の最大値、最小値、平均値を表-4.1に併記している。

表 - 4.2 特性変数候補の詳細

番号	特性変数名	漏水系			剥離系		
		最大値	最小値	平均値	最大値	最小値	平均値
1	大型車累積軸数	2094E+4	1387E+2	9302E+3	2094E+4	1387E+2	9788E+3
2	内在塩分	1	0	0.1647	1	0	0.1876
3	ASR	1	0	0.02609	1	0	0.02559
4	凍結防止剤 (t/km)	3725.5	26.453	1003.6	3725.5	26.453	1079.5

4.4.2 データの1次分析

漏水系，剥離系変状に関わるデータを用いて，供用開始後の経過年数と変状発生数の累積値の関係を分析した結果を図-4.3，図-4.4 に示している．横軸は分析の対象となった橋梁が供用開始されてからの経過年数を表す．縦軸は点検時点までに発生した変状の累積発生数を表している．漏水系変状，剥離系変状のそれぞれに対して累積変状数が 200 個未満である橋梁数が多いため，図-4.3，図-4.4 の右側に累積変状数が 200 個未満の橋梁を対象を絞って，経過年数と累積変状数の関係を拡大して示している．両図より，供用後の経過年数と累積変状発生数の間に正の相関関係を見出すことができる．また，分析対象とする橋梁の特性や使用環境が橋梁ごとに多様に異なるため，経過年数が同じでも累積変状発生数には大きな分散が見出せる．漏水系変状に関しては，経過年数が 20 年程度で累積変状発生数が極端に多い橋梁が見出せるものの，これらの図より経過年数が増加するほど累積変状数が増加する傾向を確認することができる．また，図-4.3，図-4.4 より，経過年数による累積変状数の変化傾向は，漏水系と剥離系により異なる特性を持っていることが理解できる．

4.4.3 モデルの推計結果

4.4.1 で述べたデータベースに基づいて，漏水系変状，剥離系変状のそれぞれに対して変状数発生確率モデルを推計した．推計にあたり，潜在変状数に影響を

表 - 4.3 モデルの推計結果

漏水系					
特性変数名 パラメータ	定数項 γ_0	大型車累積軸数 γ_1	凍結防止剤 γ_4	μ	α
推定値	3.015E-2	5.372E-3	2.793E-2	1.211E-4	3.523
(<i>t</i> -値)	(128.2)	(18.24)	(67.98)	(5.185)	(47.91)
対数尤度	1.045E+6				
AIC	-2.090E+6				
剥離系					
特性変数名 パラメータ	定数項 γ_0	凍結防止剤 γ_4	-	μ	α
推定値	18.61	31.74	-	2.204E-7	2.551
(<i>t</i> -値)	(30.94)	(26.93)	-	(29.76)	(232.7)
対数尤度	7.618E+5				
AIC	-1.524E+6				

及ぼすような特性変数 y の候補として、1) 供用開始から平成 23 年までの大型車累積 10t 換算軸数、2) 内在塩分の有無 (有 = 1, 無 = 0)、3) ASR 判定の有無 (判定有 = 1, 判定無 = 0)、4) 平成 23 年度末時点の累計凍結防止剤散布量 (t/km)、の 4 つをとりあげた。表-4.2 に、採用した特性変数の概要を示している。内在塩分の有無、および ASR 判定の有無は質的変数であるため、0-1 変数を設定している。なお、特性変数ベクトルは表-4.2 に示す各特性の最大値を用いて除することにより正規化している。その上で、これらの特性変数の組合せの中からパラメータの符号条件と *t*-検定統計量を考慮し、AIC²⁷⁾ の最小化を達成する特性変数の組合せをもっとも望ましいモデルとして選択した。なお、AIC は推計されたモデルの対数尤度関数 $\hat{\mathcal{L}}$ とモデルの未知パラメータの数 q を用いて、

$$AIC = -2 \ln \hat{\mathcal{L}} + 2q \quad (4.29)$$

と表現できる。漏水系、剥離系変状のそれぞれに対する変状数発生確率モデルの推計結果を表-4.3 に示している。

4.4.4 漏水系変状に関する分析結果

表-4.3に示すように、最終的に選択された説明変数は、大型車累積10t換算軸数、累積凍結防止剤散布量である。今回採用された特性変数は、一般的に変状の発生要因とされているものであり、パラメータの最尤推定値はすべて正の値となっている。表-4.3を用いて、モデルの推計に用いたデータが有限母集団であるか否かを確認する。分析対象に対して有限母集団仮説が支持されるためには、現在時点までに、変状の新規発生数が時間の経過に対して遞減傾向を示すことが必要である。これは、変状数発生確率 $P_m(\tau)$ の時間的な推移グラフの変曲点が分析データの対象期間 $[0, \tau^*]$ に存在することと同義である。ただし、 $\tau^* = \max(\bar{\tau}_1, \dots, \bar{\tau}_K)$ は供用時間の最大値を表す。ここで、顕在化する変状数の期待値を考えると、変曲点は $E[P_m(\tau)]$ の2階微分が0となる時点であり、式(4.13-a)より $E[P_m(\tau)] = \lambda S \{1 - \tilde{F}(\tau)\}$ であることから、

$$\frac{dE[P_m(\tau)]}{d\tau} = \lambda S f(\tau) \quad (4.30-a)$$

$$\frac{d^2E[P_m(\tau)]}{d\tau^2} = \lambda S f(\tau) \left(\frac{\alpha - 1}{\tau} - \mu \alpha \tau^{\alpha-1} \right) \quad (4.30-b)$$

となる。したがって、 $\frac{d^2E[P_m(\tau)]}{d\tau^2} = 0$ を満たす変曲点 τ° は $\tau^\circ = \left(\frac{\hat{\alpha}-1}{\hat{\mu}\hat{\alpha}} \right)^{1/\hat{\alpha}} \doteq 11.8$ と算出される。ただし、 $\hat{\alpha}$ 、 $\hat{\mu}$ はパラメータの最尤推定値を表す。また、表-4.1の最大供用年数を用いると $\tau^* = 42$ であることから、 $0 < \tau^\circ < \tau^*$ が成立するため、推定に用いたデータは有限母集団から抽出されたサンプルであることを棄却できないと判断した。潜在的変状数に関するパラメータ λ_k は、推定したパラメータベクトル $\hat{\gamma}$ と、各橋梁の特性変数ベクトル \bar{y}_k の内積を計算することにより得ることができる。したがって、たとえば累積凍結防止剤散布量が多いIC間にある場合にはパラメータ λ_k の値は大きくなる。分析対象とした橋梁群の平均的な潜在的変状数のパラメータ $\bar{\lambda}$ は、表-4.2の大型車累積10t換算軸数と累積凍結防止剤散布量の

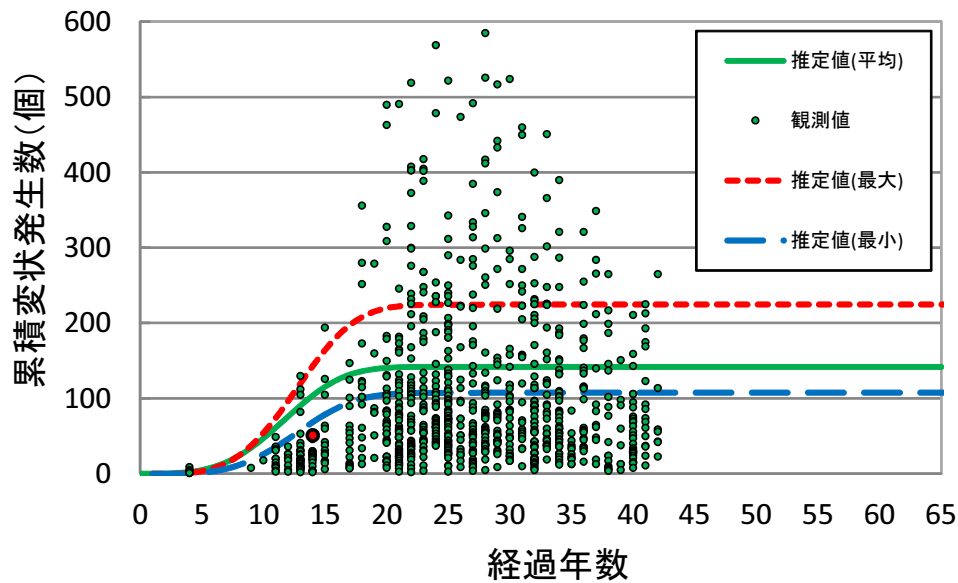


図 - 4.5 累積変状発生数と経過年数の関係

平均値を最大値を用いて正規化した値と、表-4.3の推計結果を用いて、

$$\begin{aligned}\bar{\lambda} &= 3.015E-2 + \frac{9302E+3}{2094E+4} \times 5.372E-3 + \frac{1003.6}{3725.5} \times 2.793E-2 \\ &\doteq 4.01E-2\end{aligned}\quad (4.31)$$

と算出できる。図-4.5の緑実線は、パラメータ $\bar{\lambda}$ であり橋面積が $3540.0(\text{m}^2)$ となる平均的な橋梁において、各経過時間における累積変状発生数の期待値を式(4.23)を用いて算出したグラフである。同図にはパラメータ λ_k が最大・最小となる橋梁のグラフ（赤点線・青破線：橋面積は緑実線と同じ）も併記している。同図より、各橋梁の特性により累積変状発生数が大きく異なること、平均的にはおおよそ22年ほどで新規の変状発生が見られなくなることを読み取ることができる。この事実は管理者にとっては朗報であり、剥離系変状の発生への影響という点においても、その影響度が長期的には抑制的なものに抑えられていることを意味している。潜在的変状数のパラメータ λ と橋面積 S の積は、式(4.23)の期待値が $\lambda S \{1 - \tilde{F}(\tau)\}$

で示されること、および $\{1 - \tilde{F}(\tau)\}$ は十分に長い時間を考えたとき 1 へと収束することから、各橋梁において最終的に発生するであろう累積の変状発生数、すなわち潜在変状数 n の期待値を表している。図-4.5 においては $\bar{\lambda}\bar{S} \doteq 142$ であることから潜在変状数の期待値は 142 個となる。パラメータ $\bar{\lambda} = 4.01E - 2$ において累積凍結防止剤散布量が寄与する値は $\frac{1003.6}{3725.5} \times 2.793E - 2 \doteq 7.52E - 3$ であり、寄与度は 19% 程度である。また、大型車累積 10t 換算軸数が寄与する値は $\frac{9302E+3}{2094E+4} \times 5.372E - 3 \doteq 2.39E - 3$ であり、寄与度は 6% 程度である。定数項のパラメータ推定値が $3.015E-2$ であり $4.01E-2$ の 75% 程度を占めていることを考慮すると、累積凍結防止剤散布量と大型車累積 10t 換算軸数のいずれも漏水系の変状発生に大きな影響を及ぼしていない。定数項が支配的ということは、漏水系の変状が、施工目地などの初期欠陥がひび割れに進展したもの、本来交換部品（伸縮装置・排水管等）から発生したもの、必然的に雨や塩を被る個所から発生したものなど、生来的に不可避な要因から発生することが多く、これら要因が各構造物に均等に分布しているためであると考えられる。しかし、累積凍結防止剤散布量、大型車累積 10t 換算軸数はともに供用時間とともに変化していき、影響度も増大していく。したがって、大きな影響を及ぼさないという推計結果となったものの、2つの特性変数については今後もデータを取得し続け、モデルを適時更新していく必要がある。

式 (4.23) を用いると、ある経過時点における累積変状発生数の確率分布を橋梁ごとに算出できる。算出した確率分布と橋梁の累積変状発生数の実データとを比較することにより、期待値からの乖離の程度を認識することが可能となる。図-4.5 で赤丸によって示される橋梁 A を例にとって分析をする。橋梁 A の特性ベクトルを用いてパラメータ $\hat{\lambda}_A$ と橋面積 S_A の積を計算し、さらに式 (4.23) を用いて各経過時間における累積変状発生数の確率分布を計算した後、分布関数として図示し

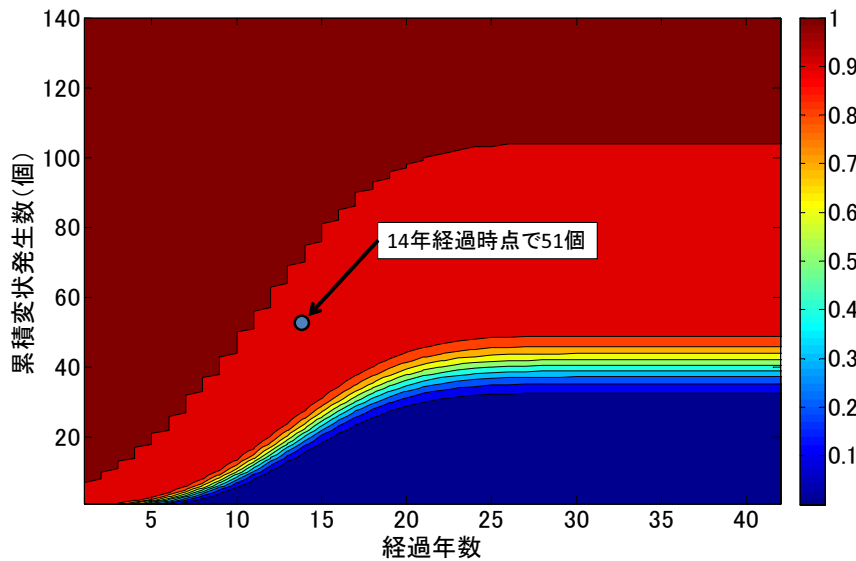


図 - 4.6 橋梁 A の累積変状発生数に対する確率分布図

た結果を図-4.6に示す。同図の横軸は経過年数、縦軸は累積変状発生数とし、着色により累積確率を表現している。橋梁 A の最新点検時点（図中の青丸）に着目すると、経過年数は 14 年であり、累積変状発生数は 51 個であった。一方、提案したモデルの推計結果では、14 年経過時点での累積変状発生数の期待値は約 22 個であり、橋梁 A は期待値から大きく乖離していることが読み取れる。また、橋梁 A の確率点は 0.9 を超えており、変状の発生数が多い原因の究明を早急に必要とする橋梁であることがわかる。

4.4.5 剥離系変状に関する分析結果

表-4.3 に示すように、最終的に選択された説明変数は累積凍結防止剤散布量のみで、パラメータの最尤推定値は正の値となっている。表-4.3 を用いて、モデルの推計に用いたデータが有限母集団であるか否かを確認する。変曲点 τ^* は $\tau^* = \left(\frac{\hat{\alpha}-1}{\hat{\mu}\hat{\alpha}}\right)^{1/\hat{\alpha}} \doteq 335$ と算出される。表-4.1 の最大供用年数より $\tau^* = 42$ であるこ

とから、 $\tau^* < \tau^0$ が成立するため、推定に用いたデータは有限母集団から抽出されたサンプルであることが棄却される可能性がある。このような結果が出た原因として、推定に用いたデータの対象期間が十分ではなく、単純に累積変状発生数の分布形状を特定化できていない可能性が存在する。この場合、現時点までに獲得された点検データに基づいて推定したパラメータの信頼性に課題が残されており、今後データの蓄積とともにモデルを再度推計し結果を更新していくことが必要である。図-4.7に、漏水系変状の分析時と同様に、各経過時間における累積変状発生数の期待値を式(4.23)を用いて算出したグラフを示す。当然のことながら、経過年数42年時点において累積変状発生数の値が収束していく様子を見ることはできない。先程と同様に分析対象とした橋梁の平均値を用いて潜在の変状数のパラメータ λ を計算すると、 $\lambda \doteq 2.781E+1$ となり、平均的な橋面積 $3596.7(m^2)$ を乗じると、潜在の変状数の期待値は $1.00E+5$ 個となる。また、収束までに要する時間を $1 - \tilde{F}(\tau) \geq 0.999$ となる τ と定義すると、収束までに870年程度を要することがわかる。図中の各曲線は、現時点で得られるデータを用いて予測することのできる曲線である。アセットマネジメントの実務上において、現時点において予測した結果を恒久的に利用して事業計画を立案するということはない。適切な時期において事業計画を見直し、その際に累積変状発生数の予測結果を見直すことを考えれば、現時点の推計結果において利用する期間は長くとも現時点から5~10年先程度であり、その範囲においては本推計結果も大きな役割を果たすことが可能である。その際、変状数が将来莫大な数となるリスクを少なからず有している点には留意が必要となる。

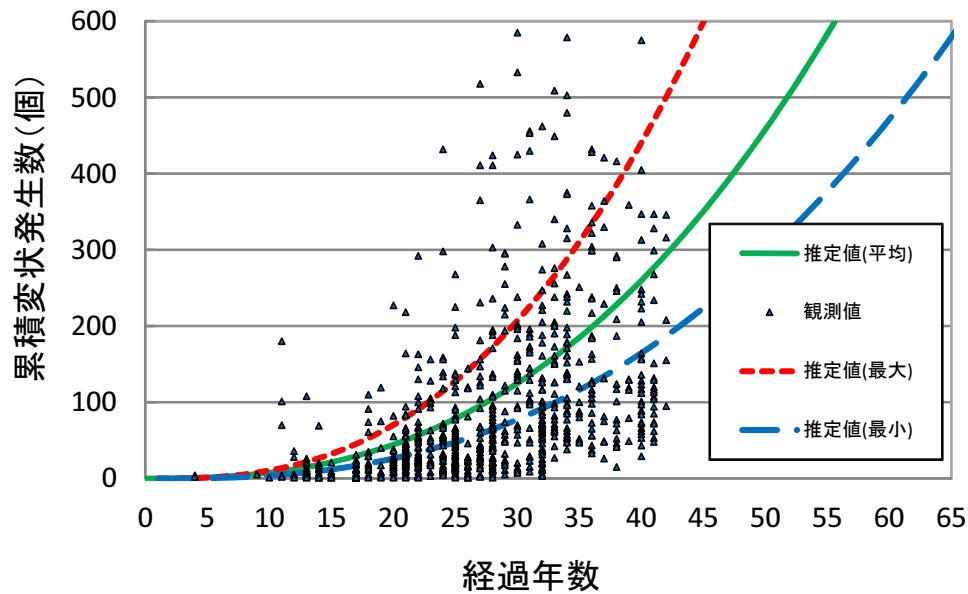


図 - 4.7 累積変状発生数と経過年数の関係

4.4.6 構造物マネジメントへの活用方法

構造物マネジメントにおいては、構造物の状態や過去の経緯を正しく認識した上で、構造物の健全性をある一定の状態で維持し続ける必要がある。安定的な構造物マネジメントを目指す上で重要となるのは、将来予測が困難で今後どの程度の規模の変状が発生するかを見通せない変状（以下、発散系変状と呼ぶ）である。発散系変状に対しては、管理上の特段の注意を払い、変状の発生数を早期に収束させる手立てを考えていかなければならない。先に分析した剥離系変状は、潜在変状数の期待値が $1.00E+5$ となり、暫定的に発散系変状に属すると考えることができる。すなわち、本論文で提案したモデルを通じて、どのような変状が発散系変状に属するかを把握することが可能となる。また、本論文においては、変状間の因果関係を分析していないが、一般的に漏水系変状は剥離系変状に大きな影響を及ぼすと考えられている。したがって、漏水系変状に対して適切な補修を実

施していれば、剥離系変状が発散系変状に属さなくなり、将来の発生規模を補修状況に応じた形で適切に予測できるようになる可能性もある。そのような影響評価を実施する場合において、本モデルを用いた分析は重要な役割を果たすことになる。

一方、将来予測が可能で、今後どの程度の規模の変状が発生するかを把握できるような変状（以下、収束系変状と呼ぶ）に対しては、個別構造物の特性や使用環境の違いを表現する特性変数の潜在的変状数に対する寄与度を明確に示すことにより、管理者が将来の変状発生数をコントロール下に置くことができるガイドラインを与えられることになる。例えば、累積凍結防止剤散布量については酢酸系等の鋼材に悪影響を及ぼさない材料の使用、大型車累積10t換算軸数については過積載車取締りによる過度な活荷重の抑制、ASRに対してはアルカリ分を非膨張性の原子に置き換える圧入工法などの抑制策があり、これらの抑制策を寄与度に応じて選択していけばよい。また、直接的な抑制が困難であっても、間接的に抑制・防御する方策（定期的な洗浄、各種防水工、脱塩工法など）を採用することを考えることもできる。本論文で利用した特性変数以外にも、先行的に発生した別の変状が分析対象とする変状に影響を及ぼすと考えられる場合には、先行的に発生した別の変状の有無や数などを特性変数として取り込み、寄与度を明確に示すことにより、新たな変状発生を抑制する補修面での手掛かりを発見したり、変状を増幅させる変状に対する補修効果についての検討も可能となる。

以上示したように、変状の将来予測を踏まえて、それをフィードバックさせることによって、現在の管理（人のマネジメントと変状のマネジメント）の在り方を見直すことが可能となる。具体には、本章で提案したモデルの分析を通じて、変状発生に寄与する要因およびその寄与度が「構造物ごと」に特定され、それに対する対策効果が「確率的・明示的」に示されることによって、個々の「対策の意

味や重要性が管理者に改めて認識される」ことに繋がる可能性が考えられる。構造物マネジメントの真の課題は、真の意味での危機感や期待や展望を持ってこれらの対策を実行できるかどうかによって、管理者が正しい危機感・期待・展望を持ち「今日やるべきことを今日やる」ために、本研究で示したような有限母集団仮説に基づく確率モデル化が有効に活用できるものと考えられる。

4.5 結言

本章では、土木構造物において変状発生の可能性のある箇所を潜在的な変状箇所とし、潜在的な変状箇所の数がポアソン分布に従うとした潜在的変状数分布モデルと、潜在的な変状箇所において変状が顕在化するか否かの時間的変化をモデル化した潜在的変状顕在化確率モデルを記述した。その上で、両モデルを合成した変状数発生確率モデルを定式化し、実際の高速道路の橋梁に発生する漏水系変状、剥離系変状に対して変状数発生確率モデルを推計した。その結果、漏水系変状は有限母集団仮説を棄却できない収束系変状であった。潜在的変状数の期待値はおおよそ橋面積で決まっており、その他の要因は大きな影響を及ぼしていないことが判明し、漏水系変状は生来的に不可避な要因によって決定付けられていることがわかった。また、各橋梁に対してある経過時点における累積変状発生数の確率分布を算出することにより、変状発生の個別の現在状態と平均的な状態との乖離の程度を定量的に認識することができ、重点管理すべき橋梁を抽出することが可能となった。剥離系変状に関しては、必ずしも有限母集団仮説は支持されない結果となった。しかし、剥離系変状が顕在化するようになってからまだ日も浅く、変状数発生確率モデルを推計するためのデータが十分に蓄積されていない可能性もある。今後、データを蓄積することにより、剥離系変状の有限母集団仮説に関して継続的に分析することが必要である。ただし、変状数が将来莫大な数と

なるリスクを少なからず有している点には留意が必要となる。

有限母集団仮説に基づく確率モデル化という分析手法は、以上に示したように、変状の特性に関する多くの知見を与え、変状の将来を予測する手法として有用であることが分かった。一方で、本章では、漏水系と剥離系という主要な変状を抽出して、独立に分析を実施した。漏水系は剥離系よりも先行的に発生することが知られており、また、先行的に発生した変状がその後の変状発生に影響を及ぼすであろうことは想像に難くない。したがって、それらの因果関係の有無、またその影響の大きさを定量的に示すことにより、漏水系の変状が剥離系の変状の発生に大きな影響を及ぼすことがわかれば、漏水系の変状を早期に補修するなど、剥離系の変状を発散系変状から収束系変状へと変化させる1つの方法を見出すことができる。この補修行為によって変状発生の未来を変える点については、第5章において、より詳細な分析を試みることにする。

付録 4.A 補足説明

構造物面積を S 、基本単位を ΔS 、基本単位の数を $M = S/\Delta S$ 、各基本単位において変状が生起する確率を λ とすると、潜在的変状数が n 個となる確率 $\zeta(n)$ は

$$\zeta(n) = {}_M C_n (1 - \lambda \Delta S)^{M-n} (\lambda \Delta S)^n \quad (4.32)$$

と表すことができる。ここで、無限に多くの同質的な基本単位を考え、 $\Delta S \rightarrow 0$ 、 $M \rightarrow \infty$ とすると、 $\zeta(n)$ は単位面積当たりの期待発生数を λ とするポワソン分布となる。

付録 4.B 式 (4.12) の導出

式 (4.12) を導出する. 式 (4.11) より, 次式を得る.

$$\begin{aligned}
 P_m &= \sum_{n=m}^{\infty} {}_n C_m P^m (1-P)^{n-m} \frac{(\lambda S)^n}{n!} \exp(-\lambda S) \\
 &= \frac{P^m \exp(-\lambda S)}{m!} \left\{ (\lambda S)^m + (1-P) \frac{(\lambda S)^{m+1}}{1!} + \dots \right. \\
 &\quad \left. + (1-P)^l \frac{(\lambda S)^{m+l}}{l!} + \dots \right\} \\
 &= \frac{(\lambda S)^m P^m \exp(-\lambda S)}{m!} \sum_{l=0}^{\infty} \frac{(1-P)^l (\lambda S)^l}{l!} \\
 &= \frac{(\lambda S)^m P^m \exp(-\lambda S)}{m!} \exp\{(1-P)\lambda S\} \\
 &= \frac{(\lambda S P)^m}{m!} \exp(-\lambda S P)
 \end{aligned} \tag{4.33}$$

参考文献

- 1) 高速道路資産の長期保全および更新のあり方に関する技術検討委員会：報告書，2014.
- 2) 小林孝一，宮川豊章：分極抵抗法を用いた鉄筋の腐食速度評価に関する研究，土木学会論文集，No.669/V-50，pp.173-186，2001.
- 3) 大野俊夫，魚本健人：コンクリートの収縮ひび割れ発生予測に関する基礎的研究，土木学会論文集，No.662/V-49，pp.29-44，2000.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) Mikosch, T.: *Non-Life Insurance Mathematics*, Springer, 2000.
- 7) McNeil, J.A., Frey, R. and Embrechts, P.: *Quantitative Risk Management*, Princeton University Press, 2005.
- 8) 貝戸清之，小林潔司，加藤俊昌，生田紀子：道路施設の巡回頻度と障害物発生リスク，土木学会論文集 F，Vol.63，No.1，pp.16-34，2007.
- 9) Lancaster, T.: *The Econometric Analysis of Transition Data*, Cambridge University Press, 1990.

- 10) Gouriéroux, C.: *Econometrics of Qualitative Dependent Variables*, Cambridge University Press, 2000.
- 11) 青木一也, 山本浩司, 津田尚胤, 小林潔司: 多段階ワイブルハザードモデル, 土木学会論文集, No.798/VI-68, pp.125-136, 2005.
- 12) 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.
- 13) 小林潔司, 貝戸清之, 林秀和: 測定誤差を考慮した隠れマルコフ劣化モデル, 土木学会論文集 D, Vol.64, No.3, pp.493-512, 2008.
- 14) 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キング, 土木学会論文集 A, Vol.64, No.4, pp.857-874, 2008.
- 15) 林秀和, 貝戸清之, 熊田一彦, 小林潔司: 競合的劣化ハザードモデル: 舗装ひび割れ過程への適用, 土木学会論文集 D, Vol.65, No.2, pp.143-162, 2009.
- 16) 小林潔司, 貝戸清之, 江口利幸, 大井明, 起塚亮輔: 舗装構造の階層的隠れマルコフ劣化モデル, 土木学会論文集 D3, Vol.67, No.4, pp.422-440, 2011.
- 17) Le Thanh NAM, 貝戸清之, 小林潔司, 起塚亮輔: ポアソン隠れマルコフ劣化モデルによる舗装劣化過程のモデル化, 土木学会論文集 F4, Vol.68, No.2, pp.62-79, 2012.
- 18) 水谷大二郎, 貝戸清之, 小林潔司, 秀島栄三, 山田洋太, 平川恵士: 判定基準変更を考慮した隠れマルコフ劣化ハザードモデル, 土木学会論文集 D3, Vol.71, No.2, pp.70-89, 2015.

- 19) 水谷大二郎, 小濱健吾, 貝戸清之, 小林潔司: 社会基盤施設の多元的劣化過程モデル, 土木学会論文集 D3, Vol.72, No.1, pp.34-51, 2016.
- 20) 小林潔司, 貝戸清之, 小濱健吾, 早矢仕廉太郎, 深谷渉: 事業体効率性評価のための確率的劣化ハザードフロンティア分析, 土木学会論文集 D3, Vol.72, No.2, pp.173-190, 2016.
- 21) 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, Vol.72, No.2, pp.47-62, 2016.
- 22) J. P. クライン, M.L. メシュベルガー (打波守訳): 生存時間解析, 丸善出版, 2012.
- 23) Moyal, J.E.: The general theory of stochastic population processes, *Acta Mathematica*, Vol.108, pp.1-31, 1962.
- 24) 梶間厚邦, 小林潔司, 小濱健吾, 貝戸清之: 高速道路における変状の発生特性と管理課題, 土木学会論文集 F4 (建設マネジメント) 特集号, Vol.73, No.4, pp153-164, 2017.
- 25) 森棟公夫: 計量経済学, 東洋経済新報社, 1999.
- 26) 磯田和男, 大野豊: 数値計算ハンドブック, オーム社, 1990.
- 27) 小西貞則, 北川源四郎: 予測と発見の科学 情報量基準, 朝倉書店, 2006.

第5章 コンクリート橋梁に対する補修遅延の影響評価分析

5.1 緒言

本章では、第3章および第4章での分析結果を受けて、変状発生のカラ関係カを直接的・確率的に評価し、補修行為によって如何にその後の変状発生は変化するか、変状はコントロール可能かについて、変状発生と補修実施の時間的分布とその因果関係を確率的に取り扱うことによって明確にする。すなわち、変状発生のカ未来を変えるための具体的方策について検討する。一般的に、因果関係の存在を厳密に証明することは容易ではないとされているが、ここでは、因果関係は材料学的な知見や時間的前後関係から、因果関係は存在するものとして分析・評価を行う。土木構造物の変状発生における因果関係を考える上では、因果の効果、時間の効果、因果遮断（補修）の効果、母集団変化の効果を考慮する必要があるが、それらを確率モデルの中に組み込み、補修の効果、すなわち構造物マネジメントのあるべき姿について、評価することを目的とする。

構造物マネジメントの現場において、変状を経過観察（放置）し続けると、新たな別の変状に繋がって行く光景はよく見られる。管理者たちも、そうした変状間の波及・増幅関係について概ね理解はしているが、人の限定合理性に起因して迅速に補修する判断ができないでいる。また、変状発生が顕著になり、第1章で示したように未補修変状数が発散しつつあることのカ背景に、こうした因果関係があるのであろうとの蓋然性を管理者は理解している。したがって、本章が目的とするのは、この蓋然性のカ必然化の指摘であり、現在の未補修変状数のカ累積に対応

し切れないでいる状況は、自らが生み出したことであることを明確に示す点にある。このように、構造物マネジメントの問題点を指摘し、具体的方策を示すことによって、管理者が正しい危機感・期待・展望を持つことに繋がり、それが人の限定合理性を克服する役割を果たし、結果として構造物マネジメントの継続的改善が図られていくことを期待するものである。

近年、インフラ資産の老朽化の進展と、それに起因する問題が多発しており、インフラ資産の効果的なマネジメントの必要性が叫ばれている¹⁾。一般に、構造物の年齢が増加すれば、変状の発生数が増加することが想定されるが、将来時点における構造物の変状発生数に関する情報は十分ではなく、今後の変状の発生状態を予測することは非常に難しい。さらに、構造物の劣化は全てが単独、偶発的に発生しているわけではなく、変状間に因果関係が存在する場合や補修行為がその後の変状の進展や新規の変状発生に影響を及ぼしている場合もある。高速道路におけるコンクリート橋梁は、主として鉄筋コンクリート（PC構造含む）と鋼部材で構成されており、鉄筋コンクリートの健全性の低下が主要な問題のひとつとなっている。本論文では、鉄筋コンクリートに発生する変状を、発生原因と現象に基づき、初期欠陥系、漏水系、剥離系、外力系等に分類している。漏水系変状の発生は浮き・剥離・剥落・鋼材腐食等の2次的な変状に繋がる危険性があり、コンクリート片等の落下や耐荷性能・耐久性能の低下という維持管理の現場が今直面している課題の主要部分が漏水系変状に起因して起きている。また近年、劣化が著しくなっているという感覚についても、特にコンクリート剥離系の変状の多発によって印象付けられているように感じられる。漏水系変状が発生した場合、例えば、床版防水工の施工により水を遮断することによって、補修以降における疲労損傷や床版上面損傷の発生を抑制することができる²⁾。しかしながら、漏水系変状そのものが直ちに構造物の力学的強度の低下や第三者被害につながるもので

はないため、現実の高速道路マネジメントの現場では漏水系変状が未補修のまま長期間経過観察の状態経過している場合も少なくない。しかし、漏水系変状と剥離系変状の因果関係を考慮すれば、漏水系変状に対する迅速な補修が、将来時点に起こりえる潜在的な剥離系変状の発生を抑制するという効果を有しているはずである。このような補修行為がもたらす変状発生抑制の因果効果³⁾に関する研究は、筆者の知る限り、あまり蓄積されていない。

本章では、高速道路構造物の維持管理の現場において問題が顕在化している剥離系変状の発生事象に着目する。そのうえで、漏水系変状の発生が剥離系変状の発生に及ぼす時間的な影響や、漏水系変状に対する補修行為やその遅延が、剥離系変状の発生過程に与える影響を定量的に評価する方法論を提案する。具体には、道路構造物の建設時点から漏水系変状の発生までの経過時間の確率分布を記述する漏水系変状発生モデルをワイブルハザードモデルを用いて記述する。さらに、漏水系変状の発生時点を起点とし剥離系変状の発生までの経過時間の確率分布を記述する剥離系変状発生モデルを、漏水系変状発生モデルを内包するような複合ワイブルハザードモデルを用いて定式化する。さらに、漏水系変状に対する補修（あるいは補修の遅延）が剥離系変状の発生確率に及ぼす影響を、補修遅延時間と劣化要因の関数として定量的に評価する方法論を提案する。以下、**5.2**で、本章の基本的考え方を説明する。**5.3**で、漏水系変状発生モデル、剥離系変状発生モデルを定式化する。**5.4**でモデルの推計方法を説明し、**5.5**において適用事例での実証分析を通じて、漏水系変状に対する迅速な補修行為の重要性を指摘する。

5.2 本章の基本的な考え方

5.2.1 既往研究の概要

構造物の劣化に関する研究は、大きく分けて「質」の変化と「数」の変化を対象としたアプローチ手法がある。前者に関しては、複数の潜在的な変状事象が時間を通じて生起する過程をハザードモデルを用いて表現した変状発生モデルが提案されている。ハザードモデルを用いた生存時間解析に関しては信頼性解析など多くの分野で適用事例があり研究成果も豊富である^{4)~8)}。しかしながら、ハザードモデルはある特定の変状が発生するまでの時間分布を表現することを目的としており、ある構造物に発生する総変状数の時間分布を表現するものではない。一方、後者に対しては、ポアソン過程に代表される定常的な計数過程^{9),10)}を用いて、土木構造物に発生する変状の数を予測するモデル化が提案されている。計数過程では、一定の期間内に生じた事象の回数を数え上げることによって事象の発生頻度を計算し、事象の分布関数を特定化する。しかし、土木構造物は、時間とともに構造物全体の劣化が進展し、変状の発生を数えている領域内において一律に変状の発生確率が増加するという特徴を持っている。こうした観点から、第4章で示したように、梶間らは¹¹⁾土木構造物において着目する変状の累積総発生数の時間分布を予測するための変状数発生確率モデルを提案している。変状の発生する可能性のある潜在的な箇所数をポアソン分布に従う確率変数と考え、潜在的変状箇所において変状が発生するまでの経過時間分布をハザードモデルを用いて表現したうえで、これらのモデルを合成することにより潜在的変状箇所数の確率分布と時間経過による変状数の発生推移を同時推定する方法論を提案している。

一方、本章が対象とする統計的因果関係に関しては、Holland¹²⁾が、特定の効果の原因が何であるかを定義しようとするアプローチではなく、原因の影響を調べることから因果推論は始められるべきであると述べている。さらに、ルービンや

ヘックマン等により因果推論に関する理論やモデル化について研究が蓄積されている³⁾。しかしながら、土木構造物を対象とした実構造物群の観測データに基づく因果効果についての研究事例は、著者の知る限り蓄積されていない。変状発生における変状間の因果関係に関しては、第3章において示したように、梶間ら¹³⁾が高速道路構造物において発生した変状の経年的発生特性と漏水系変状と剥離系変状の間の統計的な関係に着目し、補修実績データと回帰分析に基づき、新規変状発生数に漏水未補修量の寄与度が大きいことを示している。しかしながら、変状発生に関する変状間の波及・増幅という因果効果を示唆しつつも、その因果構造の直接的な検証を試みるまでには至っていない。本章では、漏水系変状が剥離系変状に及ぼす因果関係を明示的・確率的に考慮した複合ワイブルハザードモデルを提案し、検証を試みる。

5.2.2 高速道路構造物の変状特性と研究対象

本章では、図-2.2に示すように、高速道路構造物の変状全体の6割を占め、変状データが長期に亘って蓄積されているコンクリート橋梁（鋼橋のコンクリート床版を含む）に焦点を当てることとする。橋梁の変状種別は約150種類あるが、変状の発生状況を図-2.3に、発生原因と現象に基づき整理して示している。さらに、これらの変状は、初期欠陥系、漏水系、剥離系、外力系等に分類でき、表-5.1に本研究で対象とする漏水系と剥離系の内訳を示している。本章では、この漏水系変状と剥離系変状を確率的因果構造を分析する対象としてとりあげ、漏水系変状が剥離系変状の生起に及ぼす影響を実データを用いて分析する。漏水系変状と剥離系変状の合計は変状総数の9割程度を占めているため、コンクリート橋梁の変状全体を概ね代表するものであると言える。また、変状の発生領域は、大きく桁端部と一般部（桁端部以外）に分類・記録されているが、本研究では漏水系変状

表 - 5.1 変状種別の変状系への分類・集約

漏水系変状	剥離系変状
漏水・滞水	はく離
エフロレッセンス	浮き
錆汁	鉄筋の露出・腐食
排水管の脱落	定着部の変状
伸縮装置の漏水	その他
その他	

と剥離系変状の因果関係の存在を前提とした分析を実施するため、漏水系変状が発生した後に剥離系変状が発生するといった現象が顕著に見られる桁端部を分析対象とする。

5.2.3 構造物劣化における因果関係の特性

コンクリート構造物の劣化過程に存在すると想定される変状間の因果関係の仮説を図-5.1に示す。本章で分析対象とするのは、これらの因果関係の確率的内部構造である。図-5.1において実線円で示す事象の間に、「ひび割れ→漏水→剥離（鋼材腐食）等」という変状発生の波及・増幅の因果関係を想定する。ただし、コンクリート構造物の劣化の場合には、因果関係の結果の発現には時間（波及に要する時間）遅れが存在するという特性がある。さらに、変状自らが持つ発生特性に加え、構造物マネジメントの現場ではこれに補修行為という人為的な項目が加わる。こうした関係性について、たとえば梶間らは¹³⁾、第3章でも示したように実構造物群の観測データに基づく変状発生過程において、変状固有の特性である可能性も含みつつ因果関係とは無関係の現象発生時点のみの視点から、変状発生数の分布に着目し、漏水系変状と剥離系変状の発生に15年程度のタイムラグが存在することを示している。さらに、第4章で示したように変状発生の可能性のある個所を意味する潜在的変状個所に対する有限母集団仮説に基づいた変状発生の将

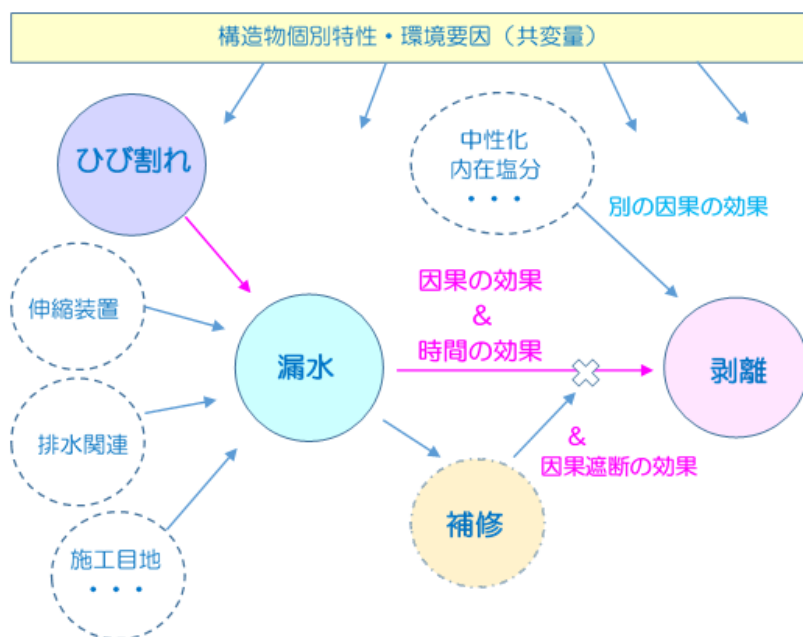


図 - 5.1 変状発生過程における因果関係

来予測において、漏水系変状は収束系変状であるのに対し、剥離系変状は現状では発散系変状であることを指摘している¹¹⁾。発散系変状は、構造物の老朽化とともに将来時点に変状数が急増する危険性があり、この危険性が主に漏水系変状との因果関係により生じているとすれば、この因果性をいかに遮断するかが構造物マネジメント上非常に大きな意味を持つことになる。一方、ある特定の変状に寄与する因果関係は1つだけではなく、別の因果関係も存在する。さらに、変状間の因果関係だけでなく、変状発生の素因としての構造物固有の特性や劣化環境要因もまた共変量³⁾として変状発生過程全体に作用している。

表-5.2は、上述の関係性について、本章で対象とする漏水と剥離を代表例として抽出し、変状発生状態別の因果関係に基づく場合分けを整理し直したものである。コンクリート構造物における変状間の因果関係を考える際に留意すべき点として、時間遅れが介在するため、分類B・Dについては、因果関係がないのか、因果関係はあるがまだ起きていないだけなのかについて直接的には識別できない。

表 - 5.2 変状の発生と補修の因果関係に基づく場合分け

因果関係の場合分け				剥離系	
				○	×
漏水系	○	補修	○	A	B
			×	C	D
	×			E	F

- ：変状（先行）発生あるいは補修実施
- ×：変状未発生あるいは補修未実施
- A：漏水に対する補修の遅延に起因して剥離が発生
- B：補修の効果により永久に剥離が発生しないのか，まだ波及の時間不足なのかが不明
- C：本研究で基本的に考えている因果関係の発現
- D：時間の効果により剥離がまだ発生していないのか，永久に発生しないのが不明
- E：漏水以外の原因により剥離が発生，変状発生の時間的前後関係が逆転している場合
- F：因果関係の対象外

また，補修をした場合でもそれが遅きに失すれば分類 A に属することになる可能性がある．さらに，別の因果関係が介在する場合には分類 E も考慮する必要がある点が挙げられる．本章では，このようなコンクリート構造物の変状発生における因果関係の特性を明示的に考慮した複合ワイブルハザードモデルを定式化することにより，漏水系変状と剥離系変状の間の因果関係に関わる確率構造と，補修行為による新規の剥離系変状の発生抑制効果を分析する方法論を提案する．

5.3 補修遅延の影響評価モデル

5.3.1 モデル化の前提条件

カレンダー時刻 s_0 を初期時点とする離散的時間軸 $t = 0, 1, 2, \dots$ を考え，離散的時間軸上の点を時点と呼び，カレンダー時刻と区別する．管理している橋梁群に対して，変状が発生するであろう箇所を $i (i = 1, \dots, I)$ とする．変状が発生するであろう箇所 i に対して，時点 $t_r^i (r = 0, \dots, R)$ に r 回目の点検が実施され，漏水系変状の発生の有無，剥離系変状の発生の有無，漏水系変状に対する補修の実施の有無が記録される． $t_0^i = 0$ は供用開始時点であり， t_R^i は最新の点検時点である．

5.3.2 ワイブルハザードモデル

供用開始時点 $t = 0$ から、時間 τ が経過していると考える。供用開始時点から変状が発生するまでの経過時間（以下、寿命と呼ぶ）を確率変数 z で表し、確率密度関数 $f(z)$ 、分布関数（累積寿命確率） $F(z)$ に従って分布すると仮定する。ただし、寿命の定義域は $[0, \infty)$ である。いま、供用開始時点から時間 z が経過した時点で箇所 i において変状が発生しない確率（以下、生存確率と呼ぶ） $\tilde{F}(z)$ は、全事象確率 1 から時間 z までに変状が発生する累積寿命確率 $F(z)$ を差し引いて、

$$\tilde{F}(z) = 1 - F(z) \quad (5.1)$$

により定義できる。ここで、供用開始時点から時間 z まで変状が発生せず、かつ期間 $[z, z + \Delta z]$ 中にはじめて変状が発生する確率は、

$$\chi(z)\Delta z = \frac{f(z)\Delta z}{\tilde{F}(z)} \quad (5.2)$$

と表せる。以下、確率密度 $\chi(z)$ をハザード関数と呼ぶ。式 (5.1) の両辺を z に関して微分することにより、

$$\frac{d\tilde{F}(z)}{dz} = -f(z) \quad (5.3)$$

を得る。このとき、式 (5.2) は、

$$\chi(z) = \frac{f(z)}{\tilde{F}(z)} = \frac{d}{dz} (-\log \tilde{F}(z)) \quad (5.4)$$

と変形できる。ここで、 $\tilde{F}(0) = 1 - F(0) = 1$ を考慮し、式 (5.4) を積分すれば、

$$\int_0^z \chi(u)du = -\log \tilde{F}(z) \quad (5.5)$$

を得る。したがって、ハザード関数 $\chi(u)$ を用いれば、期間 z にわたり変状が発生しない確率 $\tilde{F}(z)$ は、

$$\tilde{F}(z) = \exp \left[- \int_0^z \chi(u)du \right] \quad (5.6)$$

と表される。いま、漏水系変状、剥離系変状ともにハザード関数としてワイブルハザード関数

$$\chi_l(z) = \lambda m z^{m-1} \quad (5.7-a)$$

$$\chi_f(z) = \phi n z^{n-1} \quad (5.7-b)$$

を考える。ただし、 $\chi_l(z)$ は漏水系変状のハザード率を、 $\chi_f(z)$ は剥離系変状のハザード率を表している。 m, n は加速度パラメータであり変状発生確率の時間依存性を表し、 λ, ϕ は変状の発生に影響を及ぼすパラメータであり、構造物の構造条件、環境条件によって変化する。ワイブル劣化ハザード関数を用いた場合、漏水系変状の寿命に関する確率密度関数、生存確率をそれぞれ $f(z), \tilde{F}(z)$ とし、剥離系変状の寿命に関する確率密度関数、生存確率をそれぞれ $g(z), \tilde{G}(z)$ とすると、

$$f(z) = \lambda m z^{m-1} \exp(-\lambda z^m) \quad (5.8-a)$$

$$\tilde{F}(z) = \exp(-\lambda z^m) \quad (5.8-b)$$

$$g(z) = \phi n z^{n-1} \exp(-\phi z^n) \quad (5.8-c)$$

$$\tilde{G}(z) = \exp(-\phi z^n) \quad (5.8-d)$$

となる。上式をワイブルハザードモデル⁷⁾と呼ぶ。

5.3.3 複合ワイブルハザードモデル

以下では、漏水系変状が発生するであろう箇所 i のうち、実際に漏水系変状が発生した箇所 $k(k = 1, \dots, K)$ を対象とする。ただし、 $K \leq I$ である。さらに、漏水系変状が発生した後に剥離系変状が発生するといった因果関係を確定的なものと考え、変状発生確率モデルを定式化する。また、以下の議論では特定の箇所 k に着目し、添え字 k を当面の間省略する。

いま、時点 t_l に実施された $l(l = 1, \dots, R)$ 回目の点検において漏水系変状の発生

が記録され、時点 t_f に実施された $f(f = 1, \dots, R)$ 回目点検において剥離系変状の発生が記録されたとする。ただし、 $l \leq f$ である。漏水系変状は、期間 $[t_{l-1}, t_l)$ のある時点 u において発生しているが、時点 u を観測することはできない。剥離系変状は、時点 u を起点として寿命を考えることとなる。 $t_l = t_f$ のときは期間 $[u, t_f)$ のある時点 v において発生し、 $t_l < t_f$ のときは期間 $[t_{f-1}, t_f)$ のある時点 v において発生しているが、時点 v を観測することはできない。したがって、時点 t_l において漏水系変状が、また時点 t_f において剥離系変状が観測される確率 $\Pr[t_{l-1} \leq z_l < t_l, t_{f-1} \leq z_f < t_f]$ は、

$$\mu = \begin{cases} u & t_l = t_f \text{ のとき} \\ t_{f-1} & t_l < t_f \text{ のとき} \end{cases} \quad (5.9)$$

として、

$$\Pr[t_{l-1} \leq z_l < t_l, t_{f-1} \leq z_f < t_f] = \int_{t_{l-1}}^{t_l} \int_{\mu}^{t_f} f(u)g(v-u)dvdu \quad (5.10)$$

となる。一方、最新の点検時点において剥離系変状が発生していない場合、時点 t_l において漏水系変状が発生し、時点 t_R において剥離系変状が発生していない確率 $\Pr[t_{l-1} \leq z_l < t_l, z_f \geq t_R]$ は、

$$\Pr[t_{l-1} \leq z_l < t_l, z_f \geq t_R] = \int_{t_{l-1}}^{t_l} f(u)\tilde{G}(t_R - u)du \quad (5.11)$$

となる。

漏水系変状が発生したと同時に補修を実施すると、漏水系変状を原因とする剥離系変状は発生しない。したがって、漏水系変状を原因とする剥離系変状が発生しているのは、漏水系変状に対する補修の遅延が影響していると考えられる。以下では、漏水系変状に対する補修の遅延が剥離系変状の寿命に及ぼす影響を評価できるような複合ワイブルハザードモデルを定式化する。いま、補修の

遅延によって剥離系変状の寿命が短くなる現象を

$$\chi'_f(z) = \chi_f(z)D(d) \quad (5.12)$$

によって表現する。 $D(\cdot)$ は補修の遅延が剥離系変状のハザード率におよぼす影響を表す関数（以下、影響関数）であり、 d は補修の遅延時間を表す。いま、影響関数 $D(\cdot)$ を

$$D(d) = 1 - \exp(-bd^a) \quad (5.13)$$

と設定する。ただし、 a 、 b はパラメータである。式 (5.13) は、漏水系変状が発生すると同時に補修を実施した場合 ($d = 0$) には剥離系変状の発生確率は常に 0 となり、補修が遅延するに従い剥離系変状の発生確率の減少効果が小さくなっていく現象を表現している。また、十分に長い時間漏水系変状を放置したままでいると、補修による延命効果はほぼ 0 となる。補修の遅延時間 d は現実には観測できず、補修の実施の有無の記録、および漏水系変状、剥離系変状の発生に関する点検記録を用いて部分的な情報のみが得られる。

いま、 e ($e = 1, \dots, R$) 回目に実施された点検において補修の実施が記録されたと考える。ただし、 $l \leq e \leq f$ である。補修の遅延時間 d は、漏水系変状が発生してから補修が実施されるまでの時間、あるいは漏水系変状が発生してから剥離系変状が発生するまでの時間として定義できる。現実的には補修が実施された時点 w を観測することはできないが、観測できたと仮定すると、補修の遅延時間 d は $d = w - u$ として与えられる。漏水系変状の発生に関する情報、および剥離系変状の発生に関する情報を用いて、期間 $[\zeta, \eta)$ のある時点 w において補修が実施され

たと考えることができる。ただし、

$$\zeta = \begin{cases} u & t_l = t_e \text{ のとき} \\ t_{e-1} & t_l < t_e \text{ のとき} \end{cases} \quad (5.14)$$

$$\eta = \begin{cases} v & \text{剥離系変状が発生したとき} \\ t_e & \text{剥離系変状が発生していないとき} \end{cases} \quad (5.15)$$

である。ここで、補修の実施時点 w を確率変数とし、期間 $\mathbf{w} = [\zeta, \eta]$ に一様に分布していると考え。このとき、 $w \in \mathbf{w}$ の確率密度関数は、

$$U(w) = \frac{1}{\eta - \zeta} \quad (5.16)$$

で与えられる。以上より、影響関数は変数変換により、

$$D'(w) = 1 - \exp\{-b(w - u)^a\} \quad (5.17)$$

と表され、剥離系変状の寿命に関する確率密度関数、および生存確率は、

$$h(z, w) = \phi D'(w) n z^{n-1} \exp(-\phi D'(w) z^n) \quad (5.18-a)$$

$$\tilde{H}(z, w) = \exp(-\phi D'(w) z^n) \quad (5.18-b)$$

と書き換えられる。したがって、式(5.10)は、

$$\begin{aligned} & \Pr[t_{l-1} \leq z_l < t_l, t_{f-1} \leq z_f < t_f] \\ &= \int_{t_{l-1}}^{t_l} \int_{\mu}^{t_f} \int_{\zeta}^{\eta} f(u) h(v - u|w) U(w) dw dv du \end{aligned} \quad (5.19)$$

となる。ただし、

$$h(z) = \int_{\mathbf{w}} h(z, w) dw = \int_{\mathbf{w}} h(z|w) U(w) dw \quad (5.20)$$

を利用している。さらに、式(5.11)は、

$$\begin{aligned} & \Pr[t_{l-1} \leq z_l < t_l, z_f \geq t_R] \\ &= \int_{t_{l-1}}^{t_l} \int_{\zeta}^{\eta} f(u) \tilde{H}(t_R - u|w) U(w) dw du \end{aligned} \quad (5.21)$$

となる。

5.3.4 尤度関数

ここまでは、ある特定の箇所 k に着目し、添え字 k を省略して議論をした。以下では、実際に漏水系変状が発生した箇所 k を特定化する添え字 k を再び考える。いま、漏水系変状が発生した箇所 $k (k = 1, \dots, K)$ を対象として時点 $t_r^k (r = 1, \dots, R)$ に r 回目の点検が実施されたと考える。点検により、漏水系変状の発生が記録された時点に関する情報 $\mathbf{t}_L^k = \{t_{l-1}^k, t_l^k\}$ 、剥離系変状の発生に関する情報 $\mathbf{t}_F^k = \{t_{f-1}^k, t_f^k\}$ 、 $\bar{\delta}_k$ が得られる。ただし、記号「 \lceil 」は観測値であることを意味する。 t_{l-1}^k は漏水系変状が初めて記録された点検時点 t_l^k に先行する直近の点検時点を表す。同様に、 t_{f-1}^k は剥離系変状が初めて記録された点検時点 t_f^k に先行する直近の点検時点を表す。また、 $\bar{\delta}_k$ は剥離系変状の発生の有無を表すダミー変数であり、

$$\bar{\delta}_k = \begin{cases} 0 & \text{発生していない} \\ 1 & \text{発生した} \end{cases} \quad (5.22)$$

である。また、 $\bar{\delta}_k = 0$ のとき t_{f-1}^k 、 t_f^k は値を取らないが、便宜上 $t_{f-1}^k = 0$ 、 $t_f^k = 0$ とする。このとき、漏水系変状は期間 $[t_{l-1}^k, t_l^k)$ のある時点 u_k において発生する。一方、剥離系変状は期間 $[\mu^k, t_f^k)$ のある時点 v_k において発生する、あるいは最終点検時点 t_R^k においても発生していないとなる。ただし、

$$\mu_k = \begin{cases} u_k & t_l^k = t_f^k \text{ のとき} \\ t_{f-1}^k & t_l^k < t_f^k \text{ のとき} \end{cases} \quad (5.23)$$

である。さらに、点検により、補修の実施に関する情報 $\mathbf{t}_E^k = \{t_{e-1}^k, t_e^k\}$ 、 $\bar{\sigma}_k$ が得られる。ただし、 $\bar{\sigma}_k$ は補修の実施の有無を表すダミー変数であり、

$$\bar{\sigma}_k = \begin{cases} 0 & \text{補修が実施されていない} \\ 1 & \text{補修が実施された} \end{cases} \quad (5.24)$$

である。また、 $\bar{\sigma}_k = 0$ のとき \bar{t}_{e-1}^k , \bar{t}_e^k は値を取らないが、便宜上 $\bar{t}_{e-1}^k = 0$, $\bar{t}_e^k = 0$ とする。したがって、補修は期間 $[\zeta_k, \eta_k)$ のある時点 w_k において実施される、あるいは最終点検時点 \bar{t}_R^k においても実施されていないとなる。ただし、

$$\zeta_k = \begin{cases} u_k & \bar{t}_l^k = \bar{t}_e^k \text{ のとき} \\ \bar{t}_{e-1}^k & \bar{t}_l^k < \bar{t}_e^k \text{ のとき} \end{cases} \quad (5.25)$$

$$\eta_k = \begin{cases} v_k & \bar{\delta}_k = 1 \text{ のとき} \\ \bar{t}_e^k & \bar{\delta}_k = 0 \text{ のとき} \end{cases} \quad (5.26)$$

である。補修の遅延時間 d_k は、 $d_k = w_k - u_k$ によって表される。さらに、漏水系変状の発生確率が特性変数ベクトル $\bar{\mathbf{x}}_k = (\bar{x}_{k,0}, \dots, \bar{x}_{k,P})$ により影響を受け、剥離系変状の発生確率が特性変数ベクトル $\bar{\mathbf{y}}_k = (\bar{y}_{k,0}, \dots, \bar{y}_{k,Q})$ により影響を受けると考え、それぞれのハザード率に関するパラメータ λ_k , ϕ_k を

$$\lambda_k = \exp(\bar{\mathbf{x}}_k \boldsymbol{\beta}') \quad (5.27\text{-a})$$

$$\phi_k = \exp(\bar{\mathbf{y}}_k \boldsymbol{\gamma}') \quad (5.27\text{-b})$$

と表す。ただし、 $\boldsymbol{\beta} = (\beta_0, \dots, \beta_P)$, $\boldsymbol{\gamma} = (\gamma_0, \dots, \gamma_Q)$ は未知パラメータベクトルであり、 P , Q はそれぞれの特性変数の要素の数を示している。記号「 \prime 」は転置を表す。また、 $\bar{x}_{k,0} = 1$, $\bar{y}_{k,0} = 1$ は定数項を表す。いま、漏水系変状が発生した箇所 k に対して得られる観測値ベクトルを $\bar{\boldsymbol{\xi}}_k = \{\bar{t}_L^k, \bar{t}_F^k, \bar{\delta}_k, \bar{t}_E^k, \bar{\sigma}_k, \bar{t}_R^k, \bar{\mathbf{x}}_k, \bar{\mathbf{y}}_k\}$ とし、すべての発生箇所に対して観測値ベクトル $\bar{\boldsymbol{\Xi}} = \{\bar{\boldsymbol{\xi}}_1, \dots, \bar{\boldsymbol{\xi}}_K\}$ が得られたと考える。本モデルにおいて推定すべき未知パラメータベクトルを $\boldsymbol{\theta} = (\boldsymbol{\beta}, m, \boldsymbol{\gamma}, n, a, b)$ と表す。ただし、 $\boldsymbol{\beta}$, m は式 (5.7-a), (5.27-a) に示すハザード関数のパラメータ、 $\boldsymbol{\gamma}$, n は式 (5.7-b), (5.27-b) に示すハザード関数のパラメータ、 a , b は式 (5.13) に示す影響関数のパラメータである。このとき、観測値ベクトル $\bar{\boldsymbol{\Xi}}$ が生起する尤度関数 $\mathcal{L}(\boldsymbol{\theta} | \bar{\boldsymbol{\Xi}})$

は,

$$\begin{aligned}
& \mathcal{L}(\theta|\bar{\Xi}) \\
&= \prod_{k=1}^K \left\{ \int_{\bar{t}_{i-1}^k}^{\bar{t}_i^k} \int_{\mu_k}^{\bar{t}_f^k} f(u)g(v-u)dvdu \right\}^{\bar{\delta}_k(1-\bar{\sigma}_k)} \\
&\cdot \left\{ \int_{\bar{t}_{i-1}^k}^{\bar{t}_i^k} f(u)\tilde{G}(\bar{t}_R-u)du \right\}^{(1-\bar{\delta}_k)(1-\bar{\sigma}_k)} \\
&\cdot \left\{ \int_{\bar{t}_{i-1}^k}^{\bar{t}_i^k} \int_{\mu_k}^{\bar{t}_f^k} \int_{\zeta_k}^{\eta_k} f(u)h(v-u|w)U(w)dw dvdu \right\}^{\bar{\delta}_k\bar{\sigma}_k} \\
&\cdot \left\{ \int_{\bar{t}_{i-1}^k}^{\bar{t}_i^k} \int_{\zeta_k}^{\eta_k} f(u)\tilde{H}(\bar{t}_R-u|w)U(w)dw du \right\}^{(1-\bar{\delta}_k)\bar{\sigma}_k}
\end{aligned} \tag{5.28}$$

となる.

5.4 MCMC 法によるモデルの推計

5.4.1 完備化操作

尤度関数 (5.28) は観測することができない変数の期待値の計算を含み, 非常に複雑な混合分布となっている. そこで, 潜在変数を用いて尤度関数 (5.28) を簡略化することを考える. 漏水系の変状が発生した時点, 剥離系の変状が発生した時点, さらに補修が実施された時点は観測できない潜在変数である. 仮に, 各時点が $\tilde{\mathbf{u}} = (\tilde{u}_1, \dots, \tilde{u}_K)$, $\tilde{\mathbf{v}} = (\tilde{v}_1, \dots, \tilde{v}_K)$, $\tilde{\mathbf{w}} = (\tilde{w}_1, \dots, \tilde{w}_K)$ のように観測できたと考える. ただし, 剥離系の変状が発生していない場合 ($\bar{\delta}_k = 0$ のとき) \tilde{v}_k は値を取ることはないが, 便宜上 $\tilde{v}_k = 0$ とする. 同様に, 補修が実施されていない場合 ($\bar{\sigma}_k = 0$ のとき), $\tilde{w}_k = 0$ とする. 潜在変数ベクトル $\tilde{\mathbf{u}}, \tilde{\mathbf{v}}, \tilde{\mathbf{w}}$ を与件としたとき, 尤度関数 (5.28) は,

$$\tilde{\mathcal{L}}(\theta|\bar{\Xi}, \tilde{\mathbf{u}}, \tilde{\mathbf{v}}, \tilde{\mathbf{w}}) = \prod_{k=1}^K \ell_k(\theta|\bar{\Xi}, \tilde{u}_k, \tilde{v}_k, \tilde{w}_k) \tag{5.29}$$

と表すことができる。ただし,

$$\begin{aligned}
 & \ell_k(\boldsymbol{\theta}|\bar{\boldsymbol{\Xi}}, \tilde{u}_k, \tilde{v}_k, \tilde{w}_k) \\
 &= \left\{ f(\tilde{u}_k)g(\tilde{v}_k - \tilde{u}_k)^{\bar{\delta}_k} \tilde{G}(\bar{t}_R - \tilde{u}_k)^{(1-\bar{\delta}_k)} \right\}^{(1-\bar{\sigma}_k)} \\
 & \cdot \left\{ f(\tilde{u}_k)h(\tilde{v}_k - \tilde{u}_k|\tilde{w}_k)^{\bar{\delta}_k} \tilde{H}(\bar{t}_R - \tilde{u}_k|\tilde{w}_k)^{(1-\bar{\delta}_k)} \right\}^{\bar{\sigma}_k} \\
 &= \exp(\bar{\mathbf{x}}_k \boldsymbol{\beta}') m \tilde{u}_k^{m-1} \exp\{-\exp(\bar{\mathbf{x}}_k \boldsymbol{\beta}') \tilde{u}_k^m\} \\
 & \cdot \left\{ \exp(\bar{\mathbf{y}}_k \boldsymbol{\gamma}') n (\tilde{v}_k - \tilde{u}_k)^{n-1} \right\}^{\bar{\delta}_k} \\
 & \cdot [1 - \exp\{-b(\tilde{w}_k - \tilde{u}_k)^a\}]^{\bar{\delta}_k \bar{\sigma}_k} \\
 & \cdot \exp\left[-\exp(\bar{\mathbf{y}}_k \boldsymbol{\gamma}') [1 - \exp\{-b(\tilde{w}_k - \tilde{u}_k)^a\}]^{\bar{\sigma}_k} \right] \\
 & \cdot (\tilde{v}_k - \tilde{u}_k)^{n \bar{\delta}_k} (\bar{t}_R - \tilde{u}_k)^{n(1-\bar{\delta}_k)} \quad (5.30)
 \end{aligned}$$

とする。以上の操作を完備化という¹⁴⁾。完備化された尤度関数(5.29) (以下, 完備化尤度関数と呼ぶ) の計算負荷は, 通常の尤度関数(5.28) より大幅に低減されていることが理解できる。完備化尤度関数に含まれる潜在変数ベクトル $\tilde{\mathbf{u}}, \tilde{\mathbf{v}}, \tilde{\mathbf{w}}$ は観測できない変数である。そこで完備化尤度関数を用いて潜在変数 $\tilde{\mathbf{u}}, \tilde{\mathbf{v}}$ の確率分布を推定することを考えると, 潜在変数 \tilde{u}_k の全条件付き事後確率密度は,

$$\Pr[u_k = \tilde{u}_k | \boldsymbol{\theta}, \bar{\boldsymbol{\Xi}}, \tilde{v}_k, \tilde{w}_k] \propto \ell_{u_k}(u_k | \boldsymbol{\theta}, \bar{\boldsymbol{\Xi}}, \tilde{v}_k, \tilde{w}_k) \quad (5.31)$$

と表される。ただし、

$$\begin{aligned}
& \ell_{u_k}(u_k|\boldsymbol{\theta}, \bar{\boldsymbol{\Xi}}, \tilde{v}_k, \tilde{w}_k) \\
&= u_k^{m-1} \exp\{-\exp(\bar{\mathbf{x}}_k \boldsymbol{\beta}') u_k^m\} \\
&\cdot \{\bar{\mathbf{y}}_k \boldsymbol{\gamma}' n(\tilde{v}_k - u_k)^{n-1}\}^{\bar{\delta}_k} \\
&\cdot [1 - \exp\{-b(\tilde{w}_k - u_k)^a\}]^{\bar{\delta}_k \bar{\sigma}_k} \\
&\cdot \exp\left[-\exp(\bar{\mathbf{y}}_k \boldsymbol{\gamma}') [1 - \exp\{-b(\tilde{w}_k - u_k)^a\}]^{\bar{\sigma}_k}\right] \\
&\cdot (\tilde{v}_k - u_k)^{n \bar{\delta}_k} (\bar{t}_R - u_k)^{n(1-\bar{\delta}_k)} \tag{5.32}
\end{aligned}$$

とする。同様に、 \tilde{v}_k の全条件付き事後確率密度は、

$$\Pr[v_k = \tilde{v}_k | \boldsymbol{\theta}, \bar{\boldsymbol{\Xi}}, \tilde{u}_k, \tilde{w}_k] \propto \begin{cases} 0 & \bar{\delta}_k = 0 \text{ のとき} \\ \ell_{v_k}(v_k | \boldsymbol{\theta}, \bar{\boldsymbol{\Xi}}, \tilde{u}_k, \tilde{w}_k) & \bar{\delta}_k = 1 \text{ のとき} \end{cases} \tag{5.33}$$

と表される。ただし、

$$\begin{aligned}
& \ell_{v_k}(v_k | \boldsymbol{\theta}, \bar{\boldsymbol{\Xi}}, \tilde{u}_k, \tilde{w}_k) \\
&= (v_k - \tilde{u}_k)^{n-1} \exp\left[-\exp(\bar{\mathbf{y}}_k \boldsymbol{\gamma}')\right] \\
&\cdot [1 - \exp\{-b(\tilde{w}_k - \tilde{u}_k)^a\}]^{\bar{\sigma}_k} (v_k - \tilde{u}_k)^n \tag{5.34}
\end{aligned}$$

とする。潜在変数 \tilde{w}_k に関しては、式 (5.16) から、

$$\Pr[w_k = \tilde{w}_k | \boldsymbol{\theta}, \bar{\boldsymbol{\Xi}}, \tilde{u}_k, \tilde{v}_k] = \begin{cases} 0 & \bar{\sigma}_k = 0 \text{ のとき} \\ \frac{1}{\eta_k - \zeta_k} & \bar{\sigma}_k = 1 \text{ のとき} \end{cases} \tag{5.35}$$

と表される。潜在変数に関する全条件付き事後確率密度 (5.31)~(5.33) には、未知パラメータ $\boldsymbol{\theta}$ が含まれていること、また、式 (5.31) には潜在変数 \tilde{v}_k , \tilde{w}_k が、式 (5.33) には潜在変数 \tilde{u}_k , \tilde{w}_k が、式 (5.35) には潜在変数 \tilde{u}_k , \tilde{v}_k が入り込んでおり、先験的に求めることは不可能である。そこで、本研究では MCMC 法により、未知パラ

メータ θ と同時に潜在変数ベクトル \tilde{u} , \tilde{v} , \tilde{w} を順番かつ反復的にランダム発生させる。このような手続きにより、完備化尤度関数を用いた各パラメータに関するベイズ推定値が、尤度関数 (5.28) を用いた最尤推定値に収束することが証明されている¹⁵⁾。

5.4.2 事前・事後確率密度関数の設定

完備化尤度関数 (5.29) の未知パラメータ β , m , γ , n , a , b のベイズ推定を考える。各未知パラメータの事前確率密度関数を設定する。 β , m は漏水系変状のハザード関数に関連するパラメータであり、それぞれ $(P+1)$ 次元正規分布 $\beta \sim N_{P+1}(\mu_\beta, \Sigma_\beta)$, ガンマ分布 $m \sim \mathcal{G}(s_m, \varphi_m)$ を設定する。ただし、 μ_β は多次元正規分布の期待値ベクトル、 Σ_β は多次元正規分布の分散・共分散行列であり、 s_m はガンマ分布の形状パラメータ、 φ_m はガンマ分布の尺度パラメータを表す。剥離系変状のハザード関数に関連するパラメータ γ , n についても同様に、それぞれ $(Q+1)$ 次元正規分布 $\beta \sim N_{Q+1}(\mu_\gamma, \Sigma_\gamma)$, ガンマ分布 $n \sim \mathcal{G}(s_n, \varphi_n)$ を設定する。影響関数のパラメータ a , b に対してはそれぞれガンマ分布 $a \sim \mathcal{G}(s_a, \varphi_a)$, 正規分布 $b \sim N(\mu_b, \sigma_b)$ を設定する。

事後確率密度関数は、完備化尤度関数 (5.29) と事前確率密度関数との積により表現される。いま、観測値ベクトル $\tilde{\Xi}$ と潜在変数ベクトル \tilde{u} , \tilde{v} , \tilde{w} を所与としたとき、完備化事後確率密度関数 $\Pi(\theta|\tilde{\Xi}, \tilde{u}, \tilde{v}, \tilde{w})$ は、

$$\begin{aligned} & \Pi(\theta|\tilde{\Xi}, \tilde{u}, \tilde{v}, \tilde{w}) \\ & \propto \tilde{\mathcal{L}}(\theta|\tilde{\Xi}, \tilde{u}, \tilde{v}, \tilde{w}) N_{P+1}(\mu_\beta, \Sigma_\beta) \mathcal{G}(s_m, \varphi_m) \\ & N_{Q+1}(\mu_\gamma, \Sigma_\gamma) \mathcal{G}(s_n, \varphi_n) \mathcal{G}(s_a, \varphi_a) N(\mu_b, \sigma_b) \end{aligned} \quad (5.36)$$

となる。

5.4.3 条件付き事後確率密度関数

未知パラメータの完備化事後確率密度関数 (5.36) と潜在変数の全条件付き事後確率密度 (5.31)~(5.35) を用いて, MH (Metropolis Hastings) 法により, 未知パラメータと潜在変数を同時に反復的にサンプリングすることを考える¹⁶⁾. 未知パラメータベクトル θ から, 要素 ϖ ($\varpi = \beta, m, \gamma, n, a, b$) を除いた未知パラメータベクトルを $\theta_{-\varpi}$ と表す. 未知パラメータベクトル $\theta_{-\beta}$ を既知としたときの β の条件付き完備化事後確率密度関数 $\pi(\beta|\theta_{-\beta}, \bar{\Xi}, \bar{u}, \bar{v}, \bar{w})$ は,

$$\begin{aligned} & \pi(\beta|\theta_{-\beta}, \bar{\Xi}, \bar{u}, \bar{v}, \bar{w}) \\ & \propto \prod_{k=1}^K [\exp(\bar{x}_k \beta') \exp\{-\exp(\bar{x}_k \beta') \bar{u}_k^m\}] \\ & \quad \cdot \exp\left\{-\frac{1}{2}(\beta - \mu_\beta) \Sigma_\beta^{-1} (\beta - \mu_\beta)\right\} \end{aligned} \quad (5.37)$$

と表せる. また, θ_{-m} を既知としたときの m の条件付き完備化事後確率密度関数 $\pi(m|\theta_{-m}, \bar{\Xi}, \bar{u}, \bar{v}, \bar{w})$ は,

$$\begin{aligned} & \pi(m|\theta_{-m}, \bar{\Xi}, \bar{u}, \bar{v}, \bar{w}) \\ & \propto \prod_{k=1}^K [m \bar{u}_k^{m-1} \cdot \exp\{-\exp(\bar{x}_k \beta') \bar{u}_k^m\}] m^{s_m-1} \exp\left(-\frac{m}{\varphi_m}\right) \end{aligned} \quad (5.38)$$

と表せる. 同様に, $\theta_{-\gamma}$ を既知としたときの γ の条件付き完備化事後確率密度関数 $\pi(\gamma|\theta_{-\gamma}, \bar{\Xi}, \bar{u}, \bar{v}, \bar{w})$ は,

$$\begin{aligned} & \pi(\gamma|\theta_{-\gamma}, \bar{\Xi}, \bar{u}, \bar{v}, \bar{w}) \propto \prod_{k=1}^K [\{\exp(\bar{y}_k \gamma')\}^{\bar{\delta}_k} \\ & \quad \cdot \exp\{-\exp(\bar{y}_k \gamma') [1 - \exp\{-b(\bar{w}_k - \bar{u}_k)^a\}]^{\bar{\sigma}_k}\} \\ & \quad \cdot (\bar{v}_k - \bar{u}_k)^{n \bar{\delta}_k} (\bar{t}_R - \bar{u}_k)^{n(1-\bar{\delta}_k)}] \\ & \quad \cdot \exp\left\{-\frac{1}{2}(\gamma - \mu_\gamma) \Sigma_\gamma^{-1} (\gamma - \mu_\gamma)\right\} \end{aligned} \quad (5.39)$$

となり, θ_{-n} を既知としたときの n の条件付き完備化事後確率密度関数 $\pi(n|\theta_{-n}, \bar{\Xi}, \tilde{\mathbf{u}}, \tilde{\mathbf{v}}, \tilde{\mathbf{w}})$ は,

$$\begin{aligned} \pi(n|\theta_{-n}, \bar{\Xi}, \tilde{\mathbf{u}}, \tilde{\mathbf{v}}, \tilde{\mathbf{w}}) &\propto \prod_{k=1}^K \left[\left\{ n(\tilde{v}_k - \tilde{u}_k)^{n-1} \right\}^{\bar{\delta}_k} \right. \\ &\cdot \exp \left[-\exp(\bar{\mathbf{y}}_k \boldsymbol{\gamma}') [1 - \exp\{-b(\tilde{w}_k - \tilde{u}_k)^a\}]^{\bar{\sigma}_k} \right. \\ &\cdot (\tilde{v}_k - \tilde{u}_k)^{n\bar{\delta}_k} (\bar{t}_R - \tilde{u}_k)^{n(1-\bar{\delta}_k)} \left. \left. \right] \right] n^{\delta_n-1} \exp \left(-\frac{n}{\varphi_n} \right) \end{aligned} \quad (5.40)$$

となる. さらに, θ_{-a} を既知としたときの a の条件付き完備化事後確率密度関数 $\pi(a|\theta_{-a}, \bar{\Xi}, \tilde{\mathbf{u}}, \tilde{\mathbf{v}}, \tilde{\mathbf{w}})$ は,

$$\begin{aligned} \pi(a|\theta_{-a}, \bar{\Xi}, \tilde{\mathbf{u}}, \tilde{\mathbf{v}}, \tilde{\mathbf{w}}) &\propto \prod_{k=1}^K \left[[1 - \exp\{-b(\tilde{w}_k - \tilde{u}_k)^a\}]^{\bar{\delta}_k \bar{\sigma}_k} \right. \\ &\cdot \exp \left[-\exp(\bar{\mathbf{y}}_k \boldsymbol{\gamma}') [1 - \exp\{-b(\tilde{w}_k - \tilde{u}_k)^a\}]^{\bar{\sigma}_k} \right. \\ &\cdot (\tilde{v}_k - \tilde{u}_k)^{n\bar{\delta}_k} (\bar{t}_R - \tilde{u}_k)^{n(1-\bar{\delta}_k)} \left. \left. \right] \right] a^{\delta_a-1} \exp \left(-\frac{a}{\varphi_a} \right) \end{aligned} \quad (5.41)$$

となり, θ_{-b} を既知としたときの b の条件付き完備化事後確率密度関数 $\pi(b|\theta_{-b}, \bar{\Xi}, \tilde{\mathbf{u}}, \tilde{\mathbf{v}}, \tilde{\mathbf{w}})$ は,

$$\begin{aligned} \pi(b|\theta_{-b}, \bar{\Xi}, \tilde{\mathbf{u}}, \tilde{\mathbf{v}}, \tilde{\mathbf{w}}) &\propto \prod_{k=1}^K \left[[1 - \exp\{-b(\tilde{w}_k - \tilde{u}_k)^a\}]^{\bar{\delta}_k \bar{\sigma}_k} \right. \\ &\cdot \exp \left[-\exp(\bar{\mathbf{y}}_k \boldsymbol{\gamma}') [1 - \exp\{-b(\tilde{w}_k - \tilde{u}_k)^a\}]^{\bar{\sigma}_k} \right. \\ &\cdot (\tilde{v}_k - \tilde{u}_k)^{n\bar{\delta}_k} (\bar{t}_R - \tilde{u}_k)^{n(1-\bar{\delta}_k)} \left. \left. \right] \right] \\ &\cdot \exp \left\{ -\frac{(b - \mu_b)^2}{\sigma_b^2} \right\} \end{aligned} \quad (5.42)$$

表 - 5.3 変状特性

対象橋梁数	943 橋
漏水系変状の発生数	25,584 個
剥離系変状の発生数 (漏水後)	15,794 個
漏水系変状の補修箇所数	822 箇所

と表せる。条件付き事後確率密度関数 (5.37)~(5.42) から未知パラメータベクトルを、全条件付き事後確率密度 (5.31)~(5.35) から潜在変数を、MH 法を用いて反復的にサンプリングすることにより、未知パラメータの事後分布と潜在変数の確率分布を推定する。具体的なモデル推計フローを付録 5.A で一括して説明する。

5.5 適用事例

5.5.1 適用事例の概要

NEXCO 西日本が管理するある高速道路区間を分析の対象とする。分析対象とする道路区間の延長は 1,054km であり、橋梁延長は 259km である。これらの橋梁に対して、5 年に 1 回の頻度で詳細点検が実施されており、その結果がデータベース化されている。本研究では、そのうち、小さな変状 1 つ 1 つを網羅的に記載している個別判定データを用いる。表-5.3 に、分析対象とした橋梁で発生した変状の特性を整理している。同表に示すように、分析対象とする 943 橋において発生した漏水系変状の数は 25,584 個であり、漏水系変状が発生した箇所において続いて剥離系変状が発生した箇所数は 15,794 個であった。以下において、単に剥離系変状と述べた場合、この漏水系変状を原因として生じる剥離系変状を意味する。また、漏水系変状に対して補修は 822 箇所実施されていた。

表 - 5.4 特性変数候補の詳細

特性変数名	添字	最大値	最小値	平均値
大型車累積軸数	1	2.094E+4	1387E+2	1051E+4
内在塩分	2	1	0	0.1924
ASR	3	1	0	0.03135
凍結防止剤 (t/km)	4	3726	26.45	1071

注) 2 列目の「添字」は、特性変数の各要素 $\bar{x}_{k,p}, \bar{y}_{k,q}$ の p, q に代入する値を表す。

5.5.2 データの 1 次分析

本研究で提案する複合ワイブルハザードモデルに対して、変状間の因果関係の考慮と変状発生時点等の潜在変数の考慮の有無による推定差異に関する比較検証を行うために、まず、表-5.3 に示すサンプルデータを用いて、漏水系変状、剥離系変状それぞれに対して、式 (5.8-a),(5.8-c) に示すワイブル劣化ハザードモデル⁷⁾ を推計した。すなわち、1 次分析では、漏水系変状と剥離系変状の間の因果関係を考慮していない。推計にあたり、変状発生に影響を及ぼすような特性変数 x, y の候補として、表-5.4 に示すように、1) 供用開始から平成 23 年までの大型車累積 10t 換算軸数、2) 内在塩分の有無 (有 = 1, 無 = 0 ; 塩化物総量規制以前の建設でコンクリート管理試験データ上海砂使用となっているもの、および物性試験により塩化物イオン含有量が $1.2\text{kg}/\text{m}^3$ 以上を確認済のものとして有としている)、3) ASR 判定の有無 (判定有 = 1, 判定無 = 0 ; 亀甲状ひび割れやゲル状物質の析出等が見られ疑義ありのもの、残存膨張量試験や SEM 観察・EDS 分析等を行い確定しているもの、および左記の結果に基づき同一の時代・同一使用プラントの視点から確度の高いものを判定有としている)、4) 平成 23 年度末時点の累計凍結防止剤散布量 (t/km)、の 4 つをとりあげた。内在塩分の有無、および ASR 判定の有無は質的変数であるため、ダミー変数を設定している。なお、特性変数ベクトルを用いる際には、各特性の最大値を用いて除することにより基準化している。

表 - 5.5 ワイブル劣化ハザードモデルの推計結果

漏水系変状				
パラメータ推定値				
β_0	-13.29 (-199.7)			
β_1	0.6230 (24.69)			
m	3.978 (211.5)			
剥離系変状				
	case1	case2	case3	case4
$t^{\circ 1}$	-	5.0	2.0	0.20
$t^{\circ 0}$	-	5.0	4.0	20
パラメータ推定値				
γ_0	-6.417 (-87.03)	-9.071 (-214.1)	-3.569 (-158.1)	-1.387 (-106.3)
γ_4	1.662 (23.84)	1.500 (56.74)	2.058 (82.76)	1.831 (74.73)
n	3.174 (83.37)	4.914 (237.0)	2.030 (163.9)	0.4368 (157.1)

注) ()内はt-値を表す.

推計のためには、変状発生の有無と、それまでの経過時間（生存時間）に関する情報が必要となる。漏水系変状に関しては表-5.3に示す25,584個のサンプルデータ全てを用いてモデル推計することができる。一方、剥離系変状に関しては、漏水系変状を発見した点検時点と剥離系変状を発見した点検時点（あるいは最終の点検時点）が同一であるサンプルデータ ($\bar{t}_l = \bar{t}_f$, あるいは $\bar{t}_l = \bar{t}_R$ となる合計16,686個のサンプルデータ) に対して生存時間に関する情報を得ることができない。そこで、漏水系変状を発見した後に剥離系変状を発見した8,898個のサンプルデータのみを用いた場合 (case 1), さらに、生存時間に関する情報を得られない16,686個のサンプルデータに対して恣意的に一律に生存時間 $t^{\circ 1}$, $t^{\circ 0}$ を付加しデータを加工した場合 (case 2~case 4) のそれぞれに対してモデルを推計することとした。ただし、 $t^{\circ 1}$ は剥離系変状が発生しているサンプルデータに対して付加する生存時

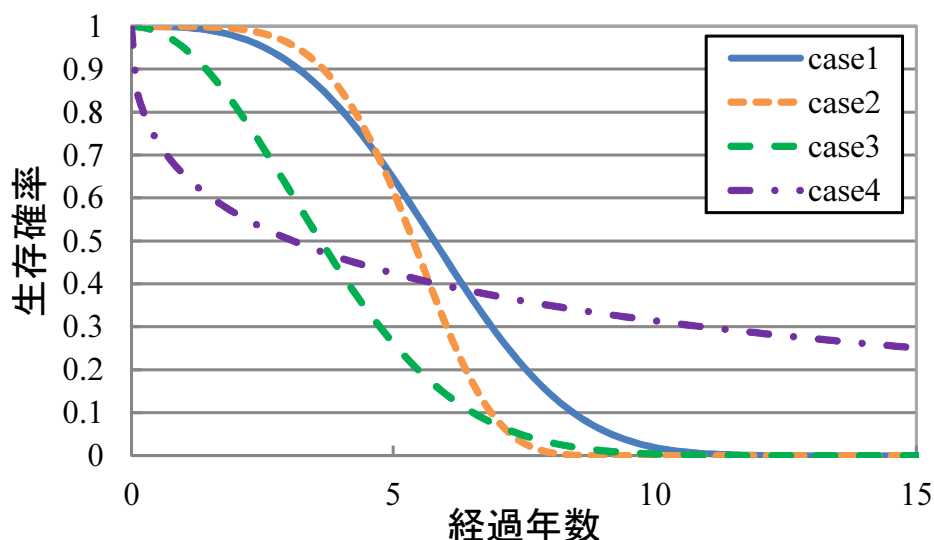


図 - 5.2 剥離系変状に対する1次分析結果

間で、漏水系変状が発生した $t^{\circ 1}$ 年後に剥離系変状の発生を仮定し、 $t^{\circ 1}$ は剥離系変状が発生していないサンプルデータに対して付加する生存時間で、漏水系変状が発生した $t^{\circ 1}$ 年後も剥離系変状の未発生を仮定している。以上の仮定の設定と1次分析結果を表-5.5に示す。漏水系変状に関しては、特性変数の中で添字1である大型車累積軸数のみが採用された。推計したモデルを用いて漏水系変状の発生確率が50%となる年数（以下、本論文では期待寿命と呼ぶ）を算出すると約23.8年であった（図-5.3の青破線参照）。剥離系変状に関しては、推計により得られた生存関数が示す生存曲線を図-5.2に示す。各曲線の形状は表-5.5に示す生存時間の設定に応じて大きく異なり、各caseにおける期待寿命も約3.1年～5.8年と大きな幅があることが読み取れる。case1においては全サンプルデータの約3分の2を除外することによるバイアスが発生していると考えられ、case2～case4においてはどの生存曲線が求めるべき曲線であるかの判別が非常に困難であることが理解できる。潜在変数を用いる複合ワイブルハザードモデルを用いれば、このような恣意性を排除することができる。また、漏水系変状と剥離系変状の間に因果

表 - 5.6 複合ワイブルハザードモデルの推計結果

パラメータ	事後分布統計量		
	標本平均	95% 上限 95% 下限	Geweke 検定統計量
β_0	-3.126	-3.088 -3.169	0.6004
m	1.136	1.150 1.124	-0.9392
γ_0	-1.089	-1.062 -1.115	0.1154
γ_4	0.8527	0.8962 0.8094	-0.9075
n	0.4629	0.4739 0.4522	0.4130
a	-	-	-
b	6.386	7.439 5.315	0.6026

関係が存在する場合、漏水系変状が発生したという観察結果や補修行為を実施したという実績に関する情報を用いて生存曲線の推計精度を向上させることができる。このような視点から、以下では **5.3.3** で定式化した複合ワイブルハザードモデルを推計する。

5.5.3 複合ワイブルハザードモデルの推計結果

5.5.1, **5.5.2** で述べたデータベース、および特性変数の候補を用いて補修遅延の効果を検討した複合ワイブルハザードモデル（以下、提案モデルと呼ぶ）を推計した。モデルの推計にあたり、全ての特性変数の候補の組合せを持つ複数のモデルから、符号条件を満たし、全てのパラメータの Geweke 検定統計量の絶対値が 1.96 以下となるようなパラメータの組合せを選定し、工学的な意味を持つモデルを抽出した。その中から、WAIC¹⁷⁾ が最小となるモデルを最も望ましいモデルとして選定した。推計結果を表-5.6 に示す。同表には 10,000 回のサンプリングによ

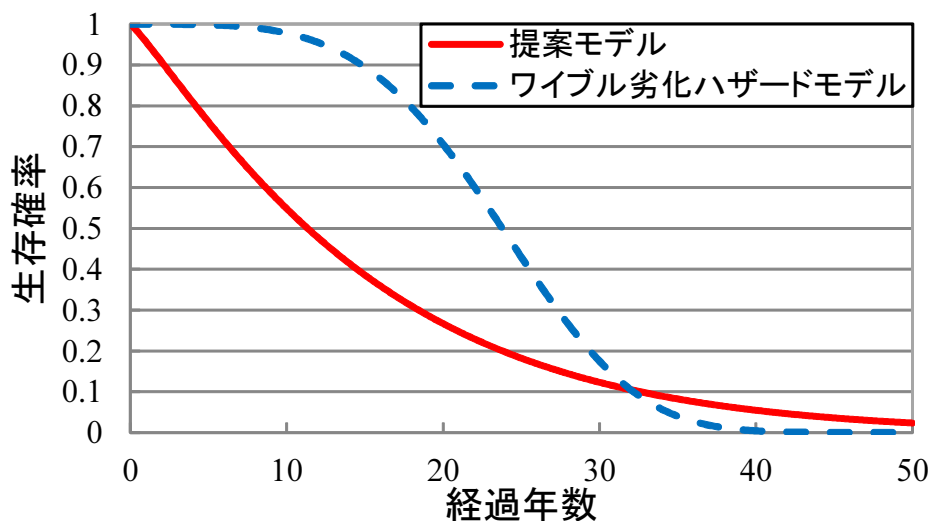


図 - 5.3 漏水系変状の生存関数

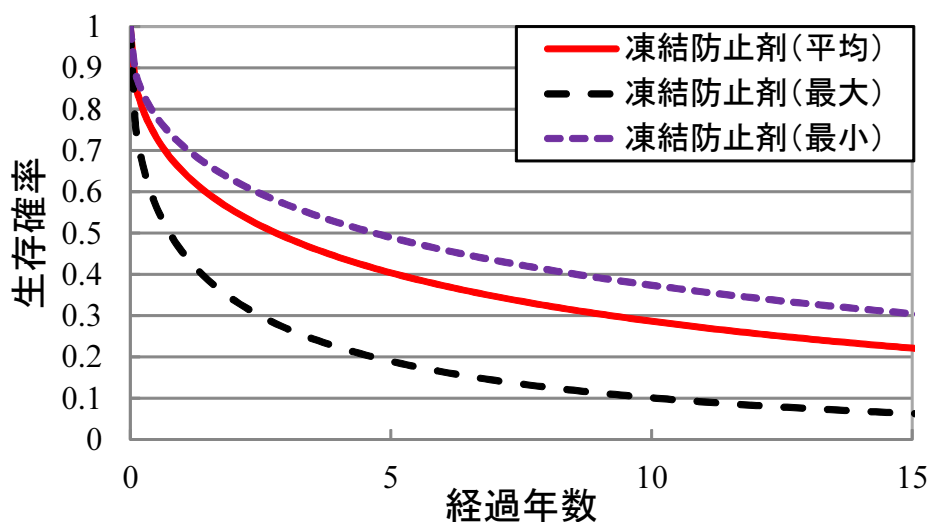


図 - 5.4 剥離系変状の生存関数

る標本の平均，95% 信用区間，Geweke 検定統計量を記している。

漏水系変状の発生確率モデルにおいて特性変数は採用されなかった（定数項 $\bar{x}_{k,0}$ のみ）。図-5.3に，推計結果より算出した生存曲線を示す。同図には，1次分析において算出した漏水系変状の生存曲線（変状発生までの経過時間）を青色破線にて併記している。赤色実線で示す提案モデルの生存曲線の期待寿命は約11.3年であ

り、1次分析の期待寿命である約23.8年と比較して、その差は約12.5年となった。これは、1次分析においては変状の発見時点と発生時点を同一時点であると仮定したこと、また漏水系変状の発生が剥離系変状の原因になるという因果関係を考慮していないために、変状発生までの経過時間をより長く評価する結果となっている。一方、提案モデルでは観測不可能な漏水系変状の発生時点を潜在変数として明示的にモデルに導入しており、かつ漏水系変状が剥離系変状の発生をもたらすという因果関係を直接モデル化しているために、推計精度が向上していると考えられる。

剥離系変状の発生確率を表現する複合ワイブルハザードモデルにおいては、特性変数として累計凍結防止剤散布量 ($\bar{y}_{k,4}$) のみが採用された。図-5.4に累計凍結防止剤散布量の多寡による剥離系変状の生存曲線の違いを示している。複合ワイブルハザードモデルを推計することにより、図-5.2におけるcase 4で求めた生存曲線と類似の生存曲線を得ることができた。すなわち、提案モデルを用いることにより、1次分析では判別することが困難であった剥離系変状の発生までの経過時間(生存時間)を適切に推計することが可能になった。また、累計凍結防止剤散布量の違いにより、漏水系変状発生から剥離系変状発生までの期待寿命が約0.8年~4.7年と変化し、凍結防止剤散布量が剥離系変状の生存時間にどの程度の影響を有しているかが明瞭に理解可能となっている。なお、平均的には期待寿命は約2.8年であった。さらに、生存曲線の形状に着目すると、剥離系変状が発生しやすい箇所では約3年程度といった短い時間で発生し、発生しづらい箇所では10年を超えても発生しない場合もありうるということが理解できる。しかし、漏水系変状が発生して間もない時期に先験的にいずれに該当するかを判別することは不可能である。したがって、リスクマネジメントの立場からは、安全側で予防的に補修し、剥離系変状の発生を極力抑止する方針で対応することが望ましいと考える。

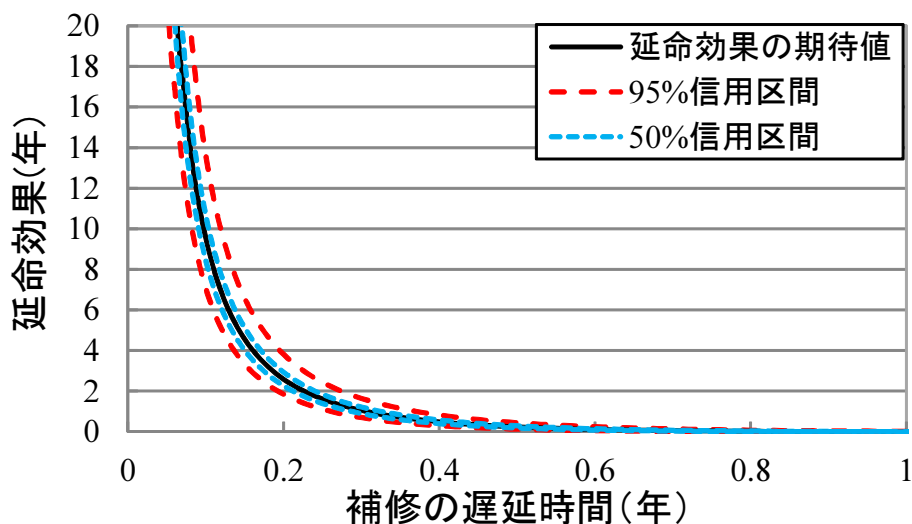


図 - 5.5 補修の遅延時間と延命効果の関係

5.5.4 補修による延命効果

推計した影響関数を用いて，補修の遅延時間 d と補修による期待寿命の延命効果の関係を分析する．影響関数のパラメータとしては b のみが採用された．延命効果 $Lf(d)$ の分布は，サンプリングした標本ベクトル $\theta^{(j)} (j = 1, \dots, 10000)$ を用いて，

$$Lf(d|\theta^{(j)}) = \arg \max_z \left\{ z \mid \tilde{H}(z, d + u|\theta^{(j)}) \geq 0.5 \right\} - \arg \max_z \left\{ z \mid \tilde{G}(z|\theta^{(j)}) \geq 0.5 \right\} \quad (5.43)$$

の順序統計量により表すことができる．結果を図-5.5 に示す．補修の遅延時間を 0.1 年とした時，延命効果の期待値は約 9.5 年であるが，50% 信用区間は [8.4, 10] であり，95% 信用区間は [7.0, 14] とかなりの幅がある．しかし，補修の遅延時間が 0.5 年になると 95% 信用区間の上限値においても延命効果は 0.45 年となり，補修の遅延時間が 1 年を超えると延命効果はほぼ 0 となる．このように，延命効果は補修が遅延すれば非常に急速に減少していくことから，補修の実施は可能な限り

表 - 5.7 因果関係に基づく分類別橋梁数

(a) 漏水発生有無による分類			(b) 因果関係に基づく分類			
漏水系	○	943	橋梁数	剥離系		
	×	159		○	×	
○：変状発生			漏水系	○	764	94
×				×	96	148
※ データ不足橋梁は除外						

迅速に実施することが望ましい。5.1 で言及したように、アセットマネジメントの実践において、ともすれば漏水系変状は重要度・切迫度の点で軽く見積もられがち傾向にある。さらに、漏水系変状を経過観察しているうちに、剥離系変状が発生し、緊急に補修対応するという事例が発生する場合も少なくない。このような現場の経験知も併せて考慮すれば、漏水系変状が観察されれば、可能な限り早い段階で補修することが、剥離系変状の発生を抑制するために不可欠である。一般的に、塩分の浸透状況や内部の腐食状態等を通常の点検では容易に知ることはできず、予測も未然の対応も難しいが、唯一、漏水系変状だけは、見つけたということだけでその後の変状発生が予測でき、非常に簡易に優先順位を判断することができる、最も簡便で有用な手掛かりとして重要視すべき変状であると言える。

以上では、漏水系変状の発生を前提とした剥離系変状の発生特性について論じてきたが、漏水系変状に起因しない剥離系変状の発生メカニズムも存在しうる。そこで、剥離系変状の発生を抑制するのに、漏水系変状を早期に補修することが有効なのか、それとも他の要因の方が支配的なのかを明確にするために、桁端領域を対象にして、表-5.2 に示す分類のうちの A と C の合計と E のそれぞれの寄与度を遡及確率を用いて算定する。表-5.7 に漏水系変状と剥離系変状の発生の有無および発生順序で分類した橋梁数を示す。ベイズの定理を用いて表-5.7 の数値に基づき確率計算を行うと、剥離系変状が発生する場合に先行的に漏水系変状が発生

している条件付確率 P は、

$$P = \frac{\frac{943}{943+159} \times \frac{764}{764+94}}{\frac{943}{943+159} \times \frac{764}{764+94} + \frac{159}{943+159} \times \frac{96}{96+148}} = 0.93 \quad (5.44)$$

となり、漏水系変状が剥離系変状の主要原因となっていることが裏付けられた。したがって、これまで述べてきた提案モデルによる補修遅延の影響評価等は、コンクリート橋梁全体において非常に重要なファクターを占めていることが理解できる。なお、以上に示した今回の推計では、より幅広い橋梁を対象にすることと計算の簡易さを優先し橋梁単位で推計することとしたが、径間情報が充実している場合には、因果関係がより密接で明瞭に現れる径間単位で推計することが望ましい。

アセットマネジメントとは組織の調整された活動とされており¹⁸⁾、適切なマネジメントの推進のためには調整の方向性を明確にすることが大前提となる。変状は必ずしもすべて偶発的に起きるものではなく、その多くは発生する理由・原因があって発生していることを考えれば、管理者はその因果の構造を理解した上で変状発生過程に積極的に働き掛ける意識が、調整の最重要の要素とも言える。本章では変状の発生原因について、一般的な劣化要因に着目するだけでなく、変状間の波及・増幅という因果関係にまでその対象範囲を拡張し、その確率過程をモデル化する方法を提示した。こうした手法を構造物の劣化全体に対して確立できれば、補修行為による新規変状発生のコントロールという、組織全体として調整された構造物マネジメントの継続的改善が実現されて行くことが期待される。

5.6 結言

本章では、高速道路構造物の維持管理の現場における中心的問題である漏水系変状に対する補修行為に対して、その遅延が剥離系変状の発生過程に与える影響の大きさ（人為の領域の影響度の大きさ）を定量的に評価する方法論を提案した。具体には、道路構造物の建設時点から漏水系変状の発生までの経過時間の確率分

布を記述する漏水系変状発生モデルをワイブルハザードモデルを用いて記述した。次に、漏水系変状の発生時点を起点とし剥離系変状の発生までの経過時間の確率分布を記述する剥離系変状発生モデルを、漏水系変状発生モデルを内包するような複合ワイブルハザードモデルを用いて定式化した。そのうえで、漏水系変状に対する補修（あるいは補修の遅延）が剥離系変状の発生に及ぼす影響を定量的に評価するモデル化を行った。実証分析の結果、得られた知見は以下の通りである。まず、観測不可能な変状発生時点を潜在変数として明示的に考慮することにより、より適切な生存時間の推計が可能となった。次に、同時に劣化要因等を特性変数として取り込み生存時間を求めることによって、主たる影響要因と影響の確率的な幅が理解可能となった。また、生存関数のグラフの形状に着目すれば、変状発生までの時間猶予の確率分布が把握でき、リスクマネジメント的な補修計画の策定に繋げることが可能となる。さらに、補修の遅延時間に応じた延命効果およびその確率分布が定量的に認識できることとなり、実効性の高い補修優先順位の策定が強い根拠を持って行えるようになる。以上のように、本章で提案したモデルを構造物全般にわたって活用することによって、変状発生における変状間の因果構造を包括的に理解することができるようになり、そこから得られる知見に基づき維持管理を行うことで、補修行為による新規変状発生のコントロール、すなわち、自然に任せる管理からの脱却が可能となり、効果的で合理的な構造物マネジメントの実現に資することが期待される。

付録 5.A MCMCによるモデルの推計フロー

Step1 初期設定

事前分布のパラメータ μ_{β} , Σ_{β} , s_m , φ_m , μ_{γ} , Σ_{γ} , s_n , φ_n , μ_b , σ_b を設定する。未知パラメータの初期値 $\beta^{(0)}$, $m^{(0)}$, $\gamma^{(0)}$, $n^{(0)}$, $a^{(0)}$, $b^{(0)}$ を設定する。

潜在変数についても初期値 $\tilde{\mathbf{u}}^{(0)}$, $\tilde{\mathbf{v}}^{(0)}$, $\tilde{\mathbf{w}}^{(0)}$ を設定する。初期値の影響は、サンプリング回数 j が増加するにつれて薄くなる。MCMC 法のバーンイン回数を \underline{j} , アルゴリズムの終了回数 \bar{j} を設定する。 $j = 1$ とする。

Step2 未知パラメータのサンプリング

未知パラメータ $\boldsymbol{\beta}^{(j)}$, $m^{(j)}$, $\boldsymbol{\gamma}^{(j)}$, $n^{(j)}$, $a^{(j)}$, $b^{(j)}$ をサンプリングする。

1. $\pi(\boldsymbol{\beta}^{(j)} | m^{(j-1)}, \boldsymbol{\gamma}^{(j-1)}, n^{(j-1)}, a^{(j-1)}, b^{(j-1)}, \bar{\boldsymbol{\Xi}}, \tilde{\mathbf{u}}^{(j-1)}, \tilde{\mathbf{v}}^{(j-1)}, \tilde{\mathbf{w}}^{(j-1)})$ から $\boldsymbol{\beta}^{(j)}$ をランダムサンプリングする。
2. $\pi(m^{(j)} | \boldsymbol{\beta}^{(j)}, \boldsymbol{\gamma}^{(j-1)}, n^{(j-1)}, a^{(j-1)}, b^{(j-1)}, \bar{\boldsymbol{\Xi}}, \tilde{\mathbf{u}}^{(j-1)}, \tilde{\mathbf{v}}^{(j-1)}, \tilde{\mathbf{w}}^{(j-1)})$ から $m^{(j)}$ をランダムサンプリングする。
3. $\pi(\boldsymbol{\gamma}^{(j)} | \boldsymbol{\beta}^{(j)}, m^{(j)}, n^{(j-1)}, a^{(j-1)}, b^{(j-1)}, \bar{\boldsymbol{\Xi}}, \tilde{\mathbf{u}}^{(j-1)}, \tilde{\mathbf{v}}^{(j-1)}, \tilde{\mathbf{w}}^{(j-1)})$ から $\boldsymbol{\gamma}^{(j)}$ をランダムサンプリングする。
4. $\pi(n^{(j)} | \boldsymbol{\beta}^{(j)}, m^{(j)}, \boldsymbol{\gamma}^{(j)}, a^{(j-1)}, b^{(j-1)}, \bar{\boldsymbol{\Xi}}, \tilde{\mathbf{u}}^{(j-1)}, \tilde{\mathbf{v}}^{(j-1)}, \tilde{\mathbf{w}}^{(j-1)})$ から $n^{(j)}$ をランダムサンプリングする。
5. $\pi(a^{(j)} | \boldsymbol{\beta}^{(j)}, m^{(j)}, \boldsymbol{\gamma}^{(j)}, n^{(j)}, b^{(j-1)}, \bar{\boldsymbol{\Xi}}, \tilde{\mathbf{u}}^{(j-1)}, \tilde{\mathbf{v}}^{(j-1)}, \tilde{\mathbf{w}}^{(j-1)})$ から $a^{(j)}$ をランダムサンプリングする。
6. $\pi(b^{(j)} | \boldsymbol{\beta}^{(j)}, m^{(j)}, \boldsymbol{\gamma}^{(j)}, n^{(j)}, a^{(j)}, \bar{\boldsymbol{\Xi}}, \tilde{\mathbf{u}}^{(j-1)}, \tilde{\mathbf{v}}^{(j-1)}, \tilde{\mathbf{w}}^{(j-1)})$ から $b^{(j)}$ をランダムサンプリングする。

Step3 潜在変数のサンプリング

潜在変数 $\tilde{\mathbf{u}}^{(j)}$, $\tilde{\mathbf{v}}^{(j)}$, $\tilde{\mathbf{w}}^{(j)}$ をサンプリングする。

1. $\Pr[u_1 = \tilde{u}_1^{(j)} | \boldsymbol{\theta}^{(j)}, \bar{\boldsymbol{\Xi}}, \tilde{v}_1^{(j-1)}, \tilde{w}_1^{(j-1)}]$ から $\tilde{u}_1^{(j)}$ をランダムサンプリングする。
- ⋮
- $\Pr[u_K = \tilde{u}_K^{(j)} | \boldsymbol{\theta}^{(j)}, \bar{\boldsymbol{\Xi}}, \tilde{v}_K^{(j-1)}, \tilde{w}_K^{(j-1)}]$ から $\tilde{u}_K^{(j)}$ をランダムサンプリングする。

2. $\Pr[v_1 = \tilde{v}_1^{(j)} | \boldsymbol{\theta}^{(j)}, \bar{\boldsymbol{\Xi}}, \tilde{\boldsymbol{u}}_1^{(j)}, \tilde{\boldsymbol{w}}_1^{(j-1)}]$ から $\tilde{v}_1^{(j)}$ をランダムサンプリングする.
- ⋮
- $\Pr[v_K = \tilde{v}_K^{(j)} | \boldsymbol{\theta}^{(j)}, \bar{\boldsymbol{\Xi}}, \tilde{\boldsymbol{u}}_K^{(j)}, \tilde{\boldsymbol{w}}_K^{(j-1)}]$ から $\tilde{v}_K^{(j)}$ をランダムサンプリングする.
3. $\Pr[w_1 = \tilde{w}_1^{(j)} | \boldsymbol{\theta}^{(j)}, \bar{\boldsymbol{\Xi}}, \tilde{\boldsymbol{u}}_1^{(j)}, \tilde{v}_1^{(j)}]$ から $\tilde{w}_1^{(j)}$ をランダムサンプリングする.
- ⋮
- $\Pr[w_K = \tilde{w}_K^{(j)} | \boldsymbol{\theta}^{(j)}, \bar{\boldsymbol{\Xi}}, \tilde{\boldsymbol{u}}_K^{(j)}, \tilde{v}_K^{(j)}]$ から $\tilde{w}_K^{(j)}$ をランダムサンプリングする.

Step4 収束判定

サンプリング回数 j が予め設定したバーンイン回数 \underline{j} より大きい場合, $\boldsymbol{\beta}^{(j)}$, $m^{(j)}$, $\boldsymbol{\gamma}^{(j)}$, $n^{(j)}$, $a^{(j)}$, $b^{(j)}$, $\tilde{\boldsymbol{u}}^{(j)}$, $\tilde{\boldsymbol{v}}^{(j)}$, $\tilde{\boldsymbol{w}}^{(j)}$ を記録し, **Step5** へ進む. それ以外の場合, $j = j + 1$ とし, **Step2** へ戻る.

Step5 アルゴリズムの終了判定

サンプリング回数 j が予め設定したアルゴリズム終了回数 \bar{j} に到達した場合アルゴリズムを終了する. それ以外の場合 $j = j + 1$ とし, **Step2** へ戻る.

参考文献

- 1) 高速道路資産の長期保全および更新のあり方に関する技術検討委員会：報告書，2014.
- 2) 松井繁之：移動荷重を受ける道路橋 RC 床版の疲労強度と水の影響について，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.9, No.2, pp.627-632, 1987.
- 3) 星野崇宏：調査観察データの統計科学，岩波書店，2009.
- 4) Lancaster, T.: *The Econometric Analysis of Transition Data*, Cambridge University Press, 1990.
- 5) Gouriéroux, C.: *Econometrics of Qualitative Dependent Variables*, Cambridge University Press, 2000.
- 6) 青木一也，山本浩司，津田尚胤，小林潔司：多段階ワイブルハザードモデル，土木学会論文集，No.798/VI-68, pp.125-136, 2005.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) McNeil, J.A., Frey, R. and Embrechts, P.: *Quantitative Risk Management*, Princeton University Press, 2005.

- 10) 貝戸清之, 小林潔司, 加藤俊昌, 生田紀子: 道路施設の巡回頻度と障害物発生リスク, 土木学会論文集 F, Vol.63, No.1, pp.16-34, 2007.
- 11) 梶間厚邦, 小林潔司, 小濱健吾, 貝戸清之: 変状数の有限性を考慮した変状生起モデル, 土木学会構造工学論文集, Vol.64A, pp.137-148, 2018
- 12) Holland, P.W.: *Statistics and Causal Inference*, Journal of the American Statistical Association, Vol.81, No.396, pp.945-960, 1986.
- 13) 梶間厚邦, 小林潔司, 小濱健吾, 貝戸清之: 高速道路における変状の発生特性と管理課題, 土木学会論文集 F4 特集号, Vol.73, No.4, pp.153-164, 2017.
- 14) Dempster, A. P., Laird, N. M. and Rubin, D. B.: Maximum likelihood from incomplete data via the EM Algorithm, *Journal of the Royal Statistical Society, Series B*, Vol.39, pp.1-38, 1977.
- 15) Diebolt, J. and Robert, C. P.: Estimation of finite mixture distributions through Bayesian sampling, *Journal of the Royal Statistical Society, Series B*, Vol.56, pp.363-375, 1994.
- 16) 水谷大二郎, 小林潔司, 風戸崇之, 貝戸清之, 松島格也: 連続量を用いた劣化ハザードモデル: 舗装耐荷力への適用, 土木学会論文集 D3, Vol.72, No.2, pp.191-210, 2016.
- 17) Watanabe, S.: Asymptotic equivalence of Bayes cross validation and widely applicable information criterion in singular learning theory, *Journal of Machine Learning Research*, Vol.11, pp.3571-3594, 2010.

- 18) 小林潔司，田村敬一，藤木修：国際標準型アセットマネジメントの方法，日刊建設工業新聞社，2016.

第6章 結論

高速道路構造物は経年劣化により老朽化が深刻化してきている。そのため、従来の延長線上ではなく、老朽化の進展に適切に対峙して行くための、新たなステージに対応できる体制の確保や効率的で合理的な対応方策が求められている。それは、地方公共団体における技術者不足や予算不足の先にある課題であると考えられる。一方で、構造物の劣化は単独・偶発的に発生しているのではなく、そこにはそうなる理由が存在する。工学的研究は、変状が発生もしくは悪化していく原因を究明し、将来の姿を予測することを中心に進められ、主として物理現象として老朽化を捉えることで、着実な成果が積み重ねられて来たことは間違いない。しかしながら、その一方で変状発生は増え続け、未補修変状数も発散傾向を示している現実があり、資産管理者は適切に変状をコントロールできないでいる。そこに介在しているのは、物理現象だけではなく、人為の領域の問題との間の相互関係であると考えられる。人為の領域の問題は、ISO5500x等を用いたルール化やツール整備等により、一定の改善・解決を図ることはできる。しかしながら、人は容易には計画通りには動かないこと、今日やるべきことを今日やれないでいることが、老朽化における現状の課題を生み、かつその課題解決やシステムの持続性を難しいものにしてている。これを解決するには、人の心理や限定合理性について詳しく探求した上で、老朽化や変状やそれに伴う課題は、人やシステムにも起因して進行・発生していること、翻って変状発生はコントロール可能であることを、現実のデータに基づき客観的・定量的に明示することを通じて意識と行動方針を変革することによってしか、解決は困難であろうと考えられる。そのため、本論

文においては、人やシステムの背後にある理由付け（言い訳）等の問題を克服する方策、変状発生と人為の領域（補修行為等）との間の相互関連構造、変状の将来の姿の予測、その将来を変えるための人為における具体的マネジメント方策について、それらを解明するための確率モデル等を用いた手法について検討・提案することとし、それらを用いた補修行為を内包した形での実証分析から得られる知見に基づき、人を律するマネジメントが見直され、適正な意思決定が導かれ、組織として調整された活動（構造物マネジメント）が確立されることを企図したものである。

第2章では、変状・劣化進行に対峙する行動の歴史と、高速道路におけるISO5500xに準じた人のマネジメントの構築の具体的行動を踏まえて、理念やルールだけでは解決困難な、現状においてもなお残る課題の存在を認識し、そうなる原因は何に由来するのか（人の限定合理性等）について考察・分析を行い、グラフ理論を用いて構造化したマネジメントサイクルの効率性/冗長性と結果の適正性についての、あるべき姿としての検証を経た上で、構造物マネジメントの背後にあるシステム自体および人に関わる抵抗要因や抵抗心理（理由付け、あるいは言い訳）の存在について省察した。その上で、システムの構造に基づけば、適切な構造物マネジメントの運用を図るためには変状のマネジメント（変状数定常化サイクルの実現、新規変状発生コントロール方策等）が必要となることを明らかにし、また構造物マネジメントが人のマネジメントと変状のマネジメントの両輪を成す形で、かつ同時解決が図れる形で、継続的改善が図られて行かなければならないことを指摘した。また、以下の各章で示す変状のマネジメントの具体的方法論から得られる、補修行為を含んだ形での客観的で定量的な知見が、変状に対する具体的方策と同時に、現場の実務者に納得感を与え、管理者に正しい危機感・期待・展望・切迫感を与え、結果として、強い根拠を持って意思決定がなされることを通じて、

課題が克服されて行くであろうことを指摘した。

第3章では、変状発生の過去から現在までを主な対象とし、現実の変状データと補修データに基づいて、変状の発生原因、変状発生の構造物別・変状種別別の時間的特性、変状発生における変状間の波及・増幅関係、補修行為と新規変状発生との間の相互関係、および補修行為に影響する累積未補修変状数の作用等についての、重回帰分析等による統計的手法を用いた分析を行った。結果として、変状発生数の有限性を示唆するとともに、変状発生に支配的な要因(漏水未補修数)、補修行為に支配的な負の要因(累積未補修変状数)を明らかにし、変状発生抑制と変状数定常化サイクルの持続的維持、すなわち変状発生コントロールの実現可能性について、高速道路の実データに基づいて実証した。

第4章では、変状発生の未来について主として論じることとし、第3章において示唆された変状発生数の有限性をテーマに、変状は有限の潜在的変状個所から順次顕在化してくるという潜在的変状数の有限母集団仮説に基づき、潜在的変状数に対してポアソン分布、また変状顕在化確率に対してワイブル分布を用いて定式化し、それらを合成した変状数発生確率モデルを用いて変状発生の未来を推定する確率モデル化の方法論を提案した。その上で、高速道路構造物に対する実証分析を通じて、構造物マネジメントの適正化に資する幾つかの方策、具体には、変状には収束系変状と発散系変状があることが認識でき、新規変状発生を抑制するための方策を講じるべき劣化要因が特定できるとともに、変状発生が異質な傾向を示す特異構造物を膨大な構造物群から抽出でき、さらに維持管理上特段の注意を払うべき発散系に位置付けられる変状が識別できる等の点について、変状数発生確率モデルを用いることで客観的・確率的な答えを導き出せることを示した。

第5章では、第4章で示された未来を変えることをテーマに人為の力に焦点を当て、変状は物理現象と人為の領域の両方に跨って進行することを踏まえて、変

状発生における変状間の因果（波及・増幅）関係の確率的内部構造を理解するために、変状発生過程に対してワイブル分布、補修遅延の影響関数に対して指数関数を用いて定式化し、因果関係を仮定した変状間において畳込み積分を行う確率モデル（複合ワイブルハザードモデル）によって補修遅延の影響を評価する方法論を提案した。その上で、高速道路構造物に対する実証分析を通じて、劣化要因の多寡に応じた変状の生存関数の確率分布と、変状発生を増幅させる原因側変状に対する補修が結果側変状に与える影響（人為行為の影響度の大きさとも言える）を確率的な幅を持って提示できることを示すことによって、実データを用いた定量的・客観的な知見に基づく合理的で効率的な構造物マネジメントの具体的方策である、新規変状発生コントロール、すなわち、自然に任せる管理からの脱却が可能となり得ることを示した。

本論文では、土木構造物のアセットマネジメントをより適切なものとしていくために、高速道路構造物の変状とそれに対するマネジメントの実態に焦点を当て、人の心理や組織やシステム自体における問題点について詳しい省察を行い、人為の領域（補修行為等）を含んだ形で様々な確率・評価モデルを構築した上で、変状発生の過去から現在を分析し、未来を予測し、未来を変えることを目的に高速道路構造物の実際の変状・補修データに各種モデルを適用し、その有用性について実証分析を行った結果、構造物マネジメントにおける意思決定を適正なものとするための具体的な方策がこれらの確率・評価モデルを活用することによって導き出せることを示した。以上のようなアプローチに基づくことで、管理者・実務者が正しい危機感・期待・展望と納得感を持つことに繋がり、変状発生のコントロール可能性の確信の下で「今日やるべきことを今日やる」という、合理的判断に基づく構造物マネジメントが実現されて行くための一つの方法論を確立できたと考える。本論文において提示した、人やシステムに対する考察、変状発生過程

の特質に関する分析，変状数の有限性についての分析，および補修遅延の影響評価分析が，土木構造物のマネジメントの更なる発展にとって有益な方法論として，少なからず寄与できることを期待するものである。

謝辞

本論文を結ぶにあたり、本論文作成にご助力を賜りました方々へ、ここに記して感謝の意を申し上げます。本研究の遂行に当たり、多くの方々にご指導、ご鞭撻を賜りました。ここに心より感謝の意を表します。まず、京都大学小林潔司教授には、本研究の内容および方針について、終始懇切丁寧なご指導、ご鞭撻を賜りました。思い起こせば2016年4月に、著者自身それまで面識すらなかったにもかかわらず小林教授のお部屋に押し掛け、NEXCO西日本在籍時にアセットマネジメント/インフラメンテナンスの新たな仕組みを悩みながら構築してきたこと、NEXCO西日本のマネジメントの更なる発展・進化のために先生のお力をお借りしたい旨をお話しさせていただき、これまで研究とはほぼ無縁であった、どこの馬の骨とも分からぬ著者を温かく迎え入れて頂き、ご指導いただくこととなりました。勤務地である広島から京都までの地の不利はありましたが、定期的に貴重なお時間を割いていただいた打合せの中で、要領を得ない説明をしている私の裏の意図まで汲んで下さり、濃密で有意義な打合せをさせていただきました。その際、いつも笑顔で、楽しく明るい関西弁でお話し下さるので、安心して打合せに臨むことができました。特に、私が週末までに作った資料を、土木学会会長の要職などの多忙な中において休日返上でご覧いただき、ご指導、ご助言をいただいたおかげで、ここまで来ることができました。著者が本研究を取りまとめるに当たり、学会発表等の様々な機会、確率モデル定式化の豊かな発想や考え方等、数多くの知識を与えてくださったことは、著者にとって大きな財産となりました。ここに、

改めて深謝の意を表するとともに、アセットマネジメントにおけるさらなる研究活動に努めて参りたいと決意する次第であります。小林先生のもとを訪れた直後の2016年5月の建設マネジメント勉強会において、著者がNEXCO西日本の保全事業システムについて紹介する発表をさせていただいた折には、京都大学大津宏康教授、京都大学河野宏隆教授をはじめ多数の先生方から、多数のありがたいご意見、ご助言をいただきましたことに、深く感謝申し上げます。また、本論文を纏め上げるに当たっても、両先生からは適切なご助言並びにご指導をいただくとともに、本研究の今後の方向性・発展性について大変貴重なご意見をいただきました。ここに心より感謝いたします。特に、建設マネジメント勉強会の夜の部までお付き合いくださった大津教授、京都大学大西正光准教授には、熊本地震直後というときでもあり、こうした際の研究者の有り様等の話題で熱いご議論が交わされ、著者もこうした方々たちの一員、端くれとなって頑張っってやってみようという気持ちにさせていただき、大いに励まされました。大阪大学NEXCO西日本高速道路学共同研究講座の小濱健吾特任准教授には、非常に多忙な中で、変状発生確率モデルや変状間の因果関係の影響評価モデルなど、劣化予測手法に関する最新の知見に基づいて様々なアドバイスをいただくとともに、非常に細かな初歩的な質問にも親切丁寧にご回答いただき、様々な知識をご教授いただきました。NEXCO西日本関連講座というご縁もあり、無理な相談も快く引き受けてくださり、悩みの相談相手にもなっていただくなど、研究活動の多くを支えて頂きました。ここに、深く感謝申し上げます。また、大阪大学貝戸清之准教授には、著者の研究成果に対して、学会発表等について様々なご助言を頂きました。ここに、深く感謝いたします。また、秘書の中本理恵氏、川端真由子氏、細見さやか氏には、打合せの場や現場視察のセット、飲み会の段取り、小林先生の健康状態の確認、学位審査手続きのご支援など、研究活動を裏から支えていただきました。心

より感謝いたします。一方、本論文で得られた成果は、高速道路のマネジメントの場で活かされてこそ意味があります。また、これだけですべての現場の問題点の解決が図れるものではありません。アセットマネジメントの様々な実務面での課題に対して、アセットマネジメントをより合理的で効率的なものとするためには、さらに継続して検討を行い続けて行く必要があります。著者が本研究を始めるきっかけとなったのは、NEXCO 西日本の保全事業システムの構築という業務課題であり、その当時、一緒に悩み規程類を作り上げた NEXCO 西日本の関係者一同にも深く感謝いたします。さらに、小林先生の門を叩くことになったきっかけを作ってくださった京都大学の先輩でもある NEXCO 西日本エンジニアリング中国の庄野豊氏には感謝しても感謝し切れません。また、研究の進捗具合をいつも気に掛けてくださった、同じく京都大学の先輩である岸洋正社長、石橋彰常務にも深く感謝いたします。また、エンジニアリング中国土木事業本部の皆様方には、研究活動に没頭している私にいつも気遣いくださり、常にご配慮いただいたことに感謝申し上げます。本研究成果は、NEXCO グループにとって非常に有用なものであると考えられることから、得られた知見を日常の維持管理業務に反映させ、マネジメントシステムのさらなる改善・向上を図っていくことが今後の重要な課題であり、引き続き努力してまいり所存であります。最後に、常に著者の研究活動を陰ながら支えてくれた妻と子供たちに感謝の意を表します。

2019 年

梶間厚邦