

論文 劣化と回復に着目した 橋梁ストックの動態分析

阿部 雅人¹・杉崎 光一²

¹正会員 株式会社BMC 研究開発部 (〒261-7125 千葉県美浜区中瀬2-6-1WBGマリブウエスト25階)

E-mail: masato@hashimori.jp

²正会員 株式会社BMC 研究開発部 (〒261-7125 千葉県美浜区中瀬2-6-1WBGマリブウエスト25階)

E-mail: sugisaki@hashimori.jp

社会インフラの維持管理においてアセットマネジメントの重要性が言われている。アセットマネジメントは、検査や対策等の維持管理業務の信頼性を向上する目的で、資源を配分するための優先順位をつけ、日々の業務を定量値に基づいて改善するための方法である。本研究では、検査データ等を利用したストック動態を把握するモデル化方法を提案する。モデルにおいては、劣化ストックの発生だけでなく、対策等による回復に着目したモデル化を行う。発生や回復の特性に関しては、発生率は経年が増えれば大きくなる、回復率は経年に対して小さくなると想定して、取替データや既存の研究を参考にしてその値を検討した。モデル化を行うことで、検査データ等からもとめられるストックの経年分布と状態分布に対して、現状の維持管理で推移した場合の将来的なストックの動態の推定や、維持管理の程度を変えることでストック動態への影響を定量的に把握することが可能となる。

Key Words: asset management, inspection data, statistic, hazard, recovery

1. はじめに

社会インフラの維持管理においてアセットマネジメントの重要性が言われている¹⁾。アセットマネジメントは、検査や対策等の維持管理業務の信頼性を向上する目的で、資源を配分するための優先順位をつけ、日々の業務を定量値に基づいて改善するための方法である。ストックの状態を可視化するためには、検査データ等を利用して、例えば劣化ストックの割合等を定量化する必要がある²⁾。また、維持管理においては、構造物の劣化が確認された場合は、何らかの対策が行われるため、これらの回復も含めたモデル化を行う必要がある。モデルを構築することでストックの劣化状態だけでなく、人や予算の適正な配分といった維持管理の現状評価が可能となる。

本研究では、維持管理情報からストックの動態を把握するモデル化方法を提案する。モデルにおいては、ストックの損傷の進展だけでなく、対策等による回復に着目したモデル化を行う。モデルにより、初期のストックの状態に対する、将来的なストックの動態のシミュレート等が可能となる。本研究の構成は、2. において橋梁の劣化や回復について、機能的劣化と構造的劣化等の概念や

取替データなどを利用して特性を整理する。3. においてモデルを提案する。また、4. においてモデルを利用したシミュレーションを行う。5. で結論を述べる。

2. 橋梁の劣化

(1) 橋梁の劣化と回復

橋梁の劣化に関して文献²⁾では構造的劣化と機能的劣化を分けて整理を行っている。各々の定義は表-1に示すものである。物理的な劣化過程などを利用した劣化曲線は構造的劣化のモデル化であると考えられるが、検査データを利用して統計的な劣化曲線を求める場合などは、損傷の程度以外にも路線や構造物の重要度なども考慮されるため、両方の要因が混在していると考えられる。劣化に対して性能を維持する行為としては、補修、補強、改造などの概念が利用されている³⁾。補強は、特に構造的性能に関して供用開始時よりも性能向上が考えられていると思われ(力学的な性能を向上⁴⁾)、改造は部材を追加する、支間を変更するといったときに利用され、転用などの概念も含んでいると考えられる。また長寿命化と

表-1 橋梁の劣化³⁾

種類	定義
機能的劣化	外的条件や要求の変化に伴って、インフラの機能が見かけ上低下すること。
構造的劣化	経年的な化学的な劣化（化学的劣化）や、材料内部の不完全性が外力によって進展・破壊する劣化（物理的劣化）、摩耗、生物的劣化などの総称

表-2 インフラ長寿命化⁹⁾

大規模な修繕や更新をできるだけ回避することが重要である。このため、施設特性を考慮の上、安全性や経済性を踏まえつつ、損傷が軽微である早期段階に予防的な修繕等を実施することで機能の保持・回復を図る「予防保全型維持管理」の導入を推進する。
--

いう概念が利用されているが、これは構造と機能を含んでおり、例えば損傷などによる保有性能の低下がある中で、要求性能を考慮した余裕度等を利用して構造物をより長く利用していくための概念であるといえ、表-2に示すような予防的な対策の有効性の根拠として検討されている⁸⁾。

構造的な劣化は、経年に応じて発生すると考えられている。例えば鋼材であれば疲労き裂、コンクリート材料であればコンクリートの中酸化などがある。それに対して、補修・補強などの効果についても、損傷の種類や施工の難易によって相違すると考えられる。このため、構造物は経年に応じて傷みやすくなり、直しにくくなる傾向があると想定される。機能的な劣化は、損傷などがなくても、交通量などの増大、耐震基準の強化などによる要求性能の向上などによる陳腐化により生じるが、それによって基準不適合などの問題が生じる¹⁰⁾。その場合は損傷を修繕する場合と相違して、損傷を直すだけでは機能を上げることができない。このような機能的な劣化に対しても、機能向上が難しい箇所が残るなど、構造的劣化と同様に経年に対して直しにくくなることが想定される。

(2) 橋梁取替数と劣化発生率

橋梁の劣化の特性を把握するためのデータとして検査データがよく利用される¹¹⁾¹²⁾。検査では損傷などに対して部材ごとに判定が行われ、対策の要否などを考慮して橋梁全体の健全度として判定が行われる。このような検査データを利用して動態モデルを構築することが可能で、その場合は判定が悪くなる場合は劣化とし、判定が上がる場合は回復とすることができ、その判定の推移データを集計することで劣化の発生率や回復率を推定することが可能となる。検査結果を利用して取替等の措置が行われるが、ここでは、橋梁の取替に関するデータを利用し

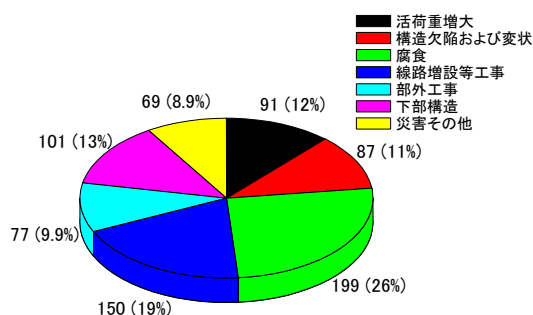


図-1 取替理由（鋼鉄道橋 連数）

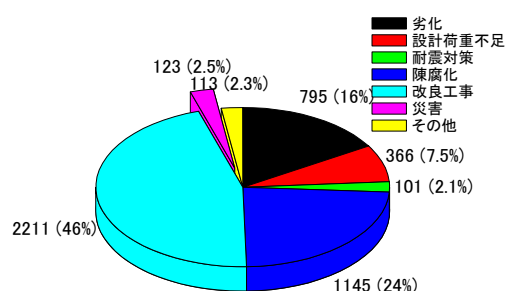


図-2 取替理由（道路橋 箇所数）

て劣化特性を検討する。取替に関しては構造的劣化と機能的劣化の混在した劣化率が算出されると考えられる。

文献(13)は国鉄の1964年～1966年までの三年間に取替えた鋼橋に関する調査であり、数量だけでなく取替の理由が整理されている。取替理由については、架替えについて単一の原因で架替えられることは少ないと考え（約8割が複合）、第2順位までの原因を集計している。図-1に取替理由の割合を示すが、欠食や腐食をはじめとした「構造欠陥および変状」以外の取替要因が半数以上をしめていることがわかる。同様な調査は道路橋でも行われており¹⁴⁾、図-2に示すように、同様の傾向がみられる。（ただし、災害による取替件数が123箇所と実状に対して極端に少ないと想定される）。

国鉄のデータから経年に対して年あたりに発生する取替比率を算出すると図-3のように整理できる。経年70年までを10年ごとの区間に、また、70年以上を一まとまりとして集計している。橋数ベースで取替比率は経年に応じて増加していると考えられ、以下の式で取替比率を表す¹⁵⁾。

$$\lambda(\tau) = \frac{m}{\alpha} \tau^{m-1} \quad (1)$$

これは、信頼性分析の故障率関数であるが、式(1)を積分することで取替数が以下のワイブル分布になることがよく知られている。

$$f(\tau) = \frac{m}{\alpha} \tau^{m-1} \exp\left(-\frac{\tau^m}{\alpha}\right) \quad (2)$$

式(1)の取替比率を実際のデータで図-3のように回帰すれば、黒線のような回帰結果を得ることができる。なお、

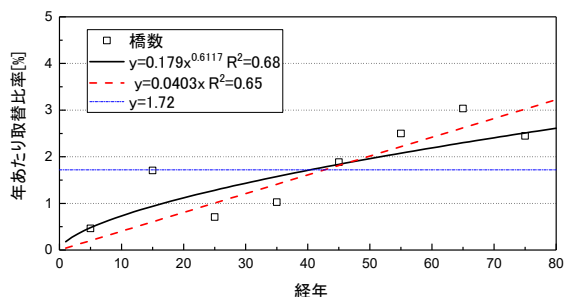


図-3 経年と取替比率

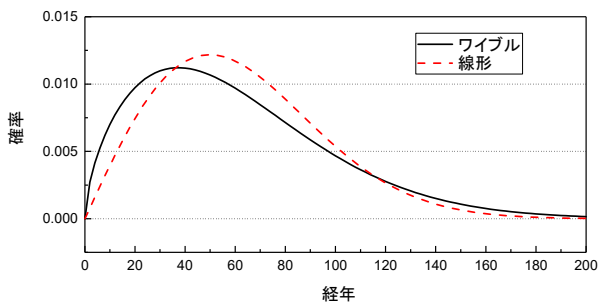


図-4 推定されるワイブル分布

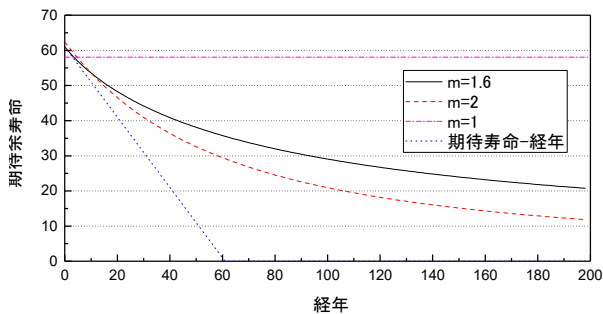


図-5 余寿命の期待値

経年 10 から 20 年にかけての取替比率が特異的に高いが、それは、この時期が戦中戦後期にあたり、鋼材も統制下にあり稀少であったため、道路橋では鋼重のみを評価した競争設計が行われていたなど、過度な軽量化の傾向があり、橋梁としての品質が低下していたと考えられる。式(2)のワイブル分布を図-4 に示すが、推定されるワイブル分布のパラメータおよび寿命の平均値は、 $m=1.6117$ 、 $\alpha=900.4$ 、平均寿命=61.0年（標準偏差38.8年）であり、標準偏差の値が極めて大きく、ばらつきの大きい分布であることなども理解することが可能である（取替が一斉に発生するわけではない）。

また、図-3には線形回帰した直線（式(1)において $m=2$ となる場合）も示すが、決定係数は大きく下らないため線形近似しても問題がないと考える。線形回帰した場合の寿命の平均値と標準偏差は 62.4 年（32.6 年）であり、ワイブル分布による推定値と大きく相違しないこともわかる。また、参考のため取替比率が経年に依存しない指数分布の場合の結果も図-3に示しているが、平均寿命は 58.1 年となる。図-4 には、線形を仮定した場合の分布についても整理しているが、経年 τ 年の構造物の余寿命の期待値

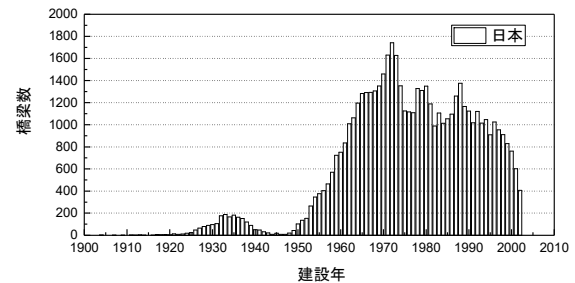
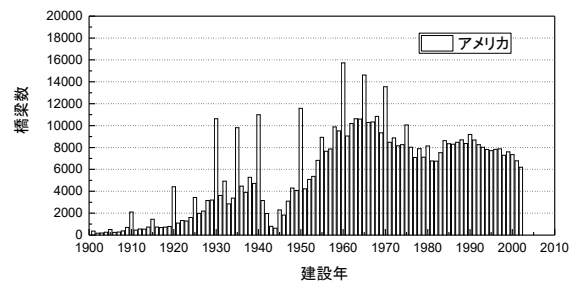


図-6 橋梁数の分布（上：アメリカ 下：日本）

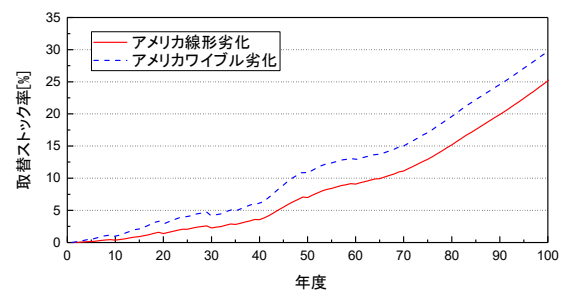


図-7 取替比率と取替ストック率

が以下の式で求められる。

$$T(\tau) = \frac{\int_{\tau}^{\infty} t f(t)}{\int_{\tau}^{\infty} f(t)} - \tau \quad (3)$$

図-5 には m を変化した場合の余寿命の期待値を示した。

算出した取替比率を利用して取替ストック率を算出した事例を示す。図-6 は 1901 年から 2002 年までのアメリカと日本の道路橋の建設データである。建設年時は健全として図-3 の取替比率を利用して米国について取替ストック率を算出した結果が図-7 である。取替比率をワイブルとした場合と線形とした場合で多少の相違はあるが、傾向等を確認する上では、線形を仮定しても問題ないと考え、以下では線形を仮定する。

3. ストック動態モデル

(1) 発生率と回復率

検査データにおける判定などを利用して劣化の発生率や回復率を求めることが可能である。その場合は、健全ストックと劣化ストックの割合から求めるが、例えば、劣化の発生率を算出する場合は、ある検査において状態 p （健全 or 劣化）の判定があり、次の検査で状態 q （健全 or

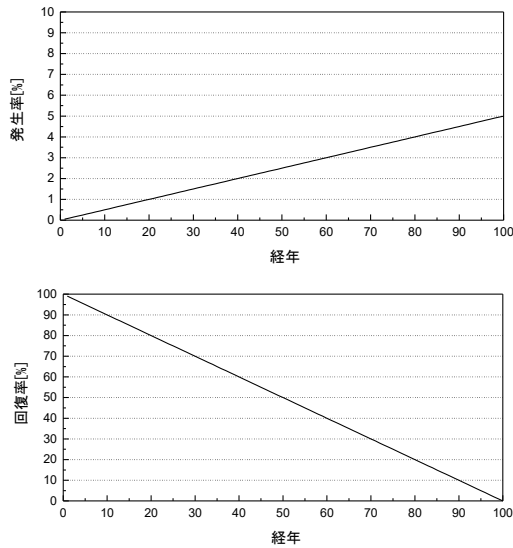


図-8 発生率と回復率

劣化) のデータ、つまり健全→劣化のサンプルから求めることができる。これはいわゆるハザード率であるが¹⁸⁾判定を多段階にしたものや、劣化要因を考慮したモデルも提案されている¹⁸⁾¹⁹⁾。本モデルでは、劣化だけでなく回復率に注目しており、回復率は劣化→健全になるサンプルの割合から求めることが可能である。発生率や回復率は2点の検査判定が必要となるが、1回目の検査判定に対して2回目の判定の率で算出するため、分母に大きく依存せずに算出可能であり、構造物の状態や、維持管理の実行状況の把握が可能となる。

具体的な率の設定については検査データが得られれば算出が可能であることは前述したが、本分析では発生率と回復率を図-8のように設定した。発生率が経年に対して大きくなり、また線形で表すことができることに関しては、取替データなどからも妥当であると考えているが、あくまでも仮定であり、実際の検査データなどを利用した検証が必要である。劣化率の値については、経年100年で5%程度のストックが劣化ストックになるような設定とした。この値の妥当性としては、文献(20)、(21)を利用しているが、文献では、システム制御理論を利用したストック動態分析の方法を示しており、旧国鉄の荒廃量のデータや地方自治体の道路橋の維持管理の実態調査を利用して劣化率が推定されている。文献では、経年に応じて劣化率を一定としており、値としては全ストックに対して、22%程度の劣化ストックが毎年発生すると考えている。本分析では、経年に応じて劣化率が大きくなるという、より実態に近い設定としており、経年に対して平均して2%程度となるように設定している。

次に、回復率については、古い構造物では構造ディテールや材料など現在のものと相違するなどで対応に時間がかかるなど、経年に対して低下すると考え、ここでは線形性を仮定して、経年0では100%回復するが、経年が

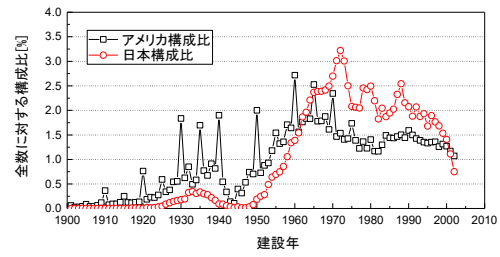


図-9 橋梁数の構成比

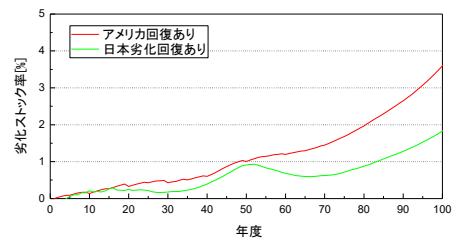
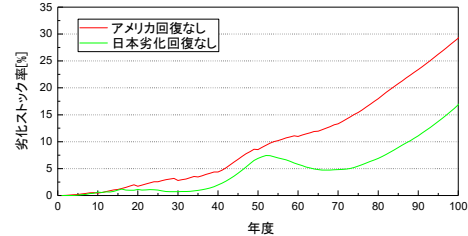


図-10 劣化ストック率の変化 (上: 回復無し 下: 回復あり)

経つ毎に回復率が下がり、100年で0になるように設定をした。既往の研究では、対策効率は劣化率と同様経年に対して一定としているが、値としては83%程度の劣化ストックが一律で毎年回復することになり、本分析における回復率の設定の参考とした。

(2) モデル

動態モデルは、建設に対する経年分布や検査データ等から求められる初期のストックの状態に対して、現状の維持管理資源でのストックの動態変化や、将来予測としては、維持管理の程度を変えるなどでストック動態への影響がどのように変化するかを把握することになる。モデルでは、初期分布と劣化ストックの発生率と、回復率が必要となり、以下のように動態ストックモデルを構築することができる。

全ストック数 $x(i, j)$

劣化ストック数 $a(i, j)$

ここで、 i : 経年 j : 時点

また、発生率 $p(i)$ 、回復率 $q(i)$ とする。

ただし、 $0 < p(i) \leq 1$ 、 $0 < q(i) \leq 1$

将来の劣化ストックの予測式は以下のように求めることができる。

$$\begin{aligned} a(i+1, j+1) &= a(i, j) + p_i[x(i, j) - a(i, j)] \\ &\quad + q_i[a(i, j)] \end{aligned} \quad (4)$$

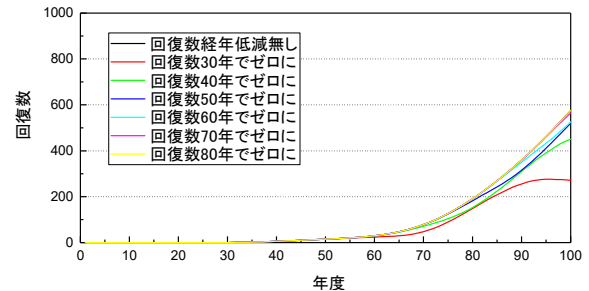
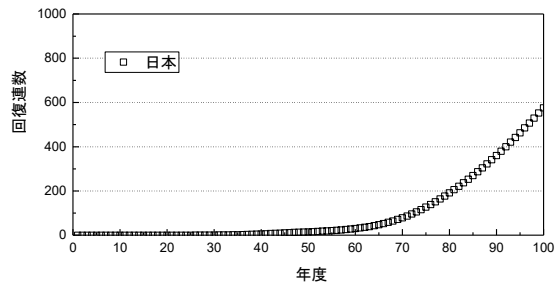
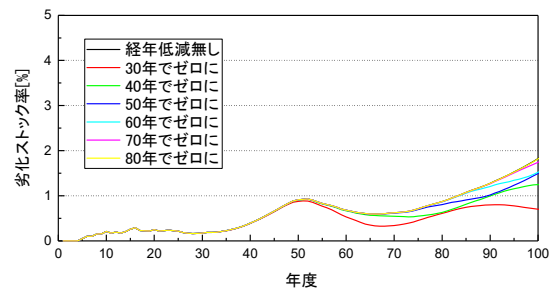
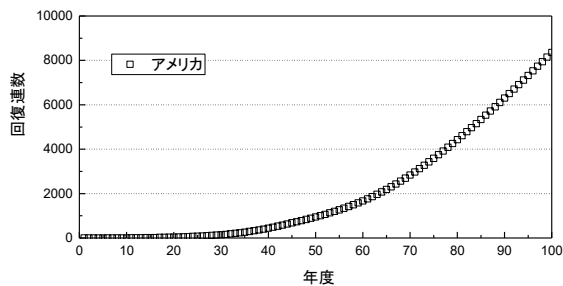


図-11 回復橋梁数の推移

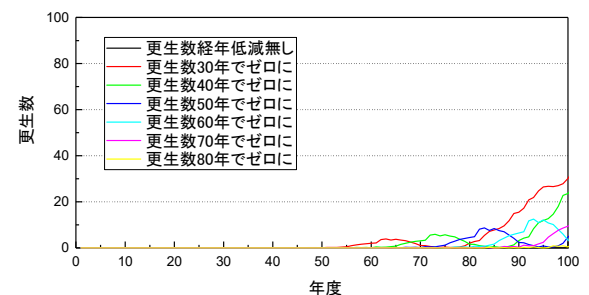
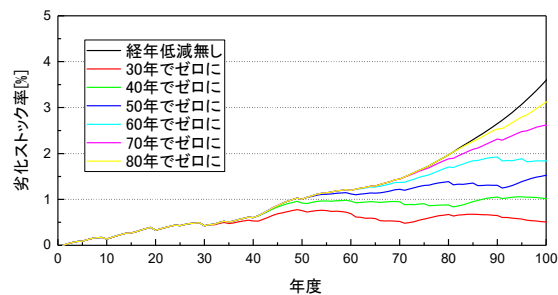


図-13 経年低減効果の検討 (日本)

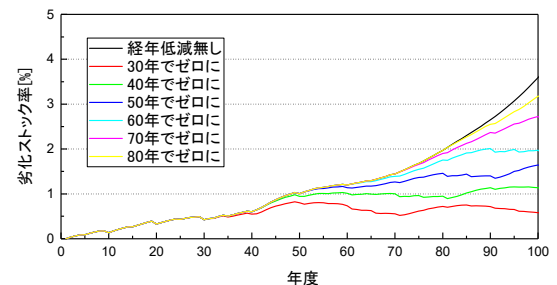
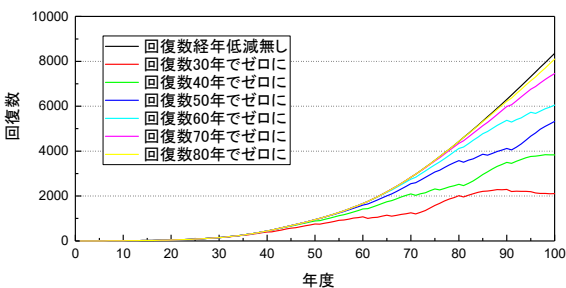


図-14 経年低減効果の検討 (アメリカ経年半分到低減)

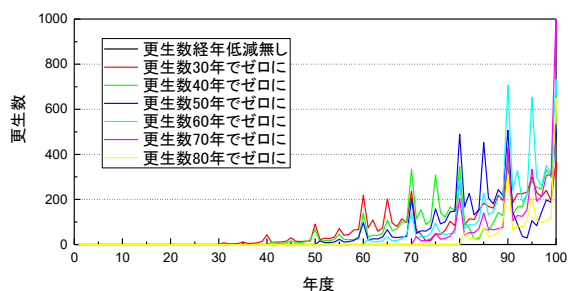


図-12 経年低減効果の検討 (アメリカ)

(3) 算出結果

実際の検査データが利用できる場合は、建設から現状を踏まえた算出が可能となるが、ここでは、動態ストックモデルの利用例として、前述したアメリカと日本の道路橋の建設データを利用する。建設年時を健全とした場

合に、図-8 の劣化発生率と回復率を仮定した場合の 2002 年時の劣化ストック率の割合を求めている。まず、図-9 には経年の構成比を示しているが、アメリカの方が日本よりも早く建設が始まっていること、また日本では高度成長期に集中して建設が行われていることがわかる。図-10 には 2 か国における劣化ストック率の推移であるが、1901 年を 0 としてその推移を示している。参考として回復をゼロとした場合の劣化ストック率の変化も併せて示しているが、回復を考慮した場合には 2002 年時の推定値として、経年の進んでいるアメリカで 4%程度、日本では 2%程度が劣化ストックであるということになる。日本の場合は、高度成長期の山があるために、一時的に劣化ストック率が下がっている期間がある。モデルの妥当性を

検討する推定値としては、図-11 に示す回復数がある。年間何橋くらいの回復が行われているかなどを利用して、図-8 の率を検証することが考えられる。

4. 簡易シミュレーション

(1) 回復率と対策効果

本分析における回復に関しては、2 章(1)で述べたように経年に応じて直しにくくなると仮定している。劣化ストックの増加を抑制するための回復の効果としては、一般的には発生率を抑制する効果が考えられる。例えば、疲労亀裂の発生が懸念される箇所の応力を低減して、亀裂の発生可能性や進展速度を下げ、劣化を抑制するといったことが想定される。また、コンクリート材料であれば中性化などの進展を遅らせるような抑制効果であろう。それに対して、回復率が経年に対して低下していくような損傷は、例えば鉄道橋において、床版として利用されてきたバックルプレート構造における亀裂や漏水変状への対策、支点部で繰り返し発生するシュー座の破損や三点支持といった損傷への対応などが挙げられる。これらの対策はディテール改良や抜本的な対策が必要である場合が多い。ただし、抜本的な対策は、活線施工、桁下交通への影響などがあるため、経年とともに対策費用が高つく場所が残存することになる。このような対策では、部分的な対策としても橋梁全体の寿命を延ばすような効果があると考えられる。橋梁の長寿命化においては、再生といった概念も利用されているが²⁾、これは部材によって寿命が相違するため、部材ごとに取替が可能な設計を目指すといった概念である。また、橋梁自体の更新は、経年がゼロになる低減効果があると考えられることができる。ここでは経年を若返らせるような対策を「更生 (rejuvenate)」と呼び、経年がゼロに戻る場合を更生率 100%、半分に戻る場合を更生率 50%等と呼ぶ。このように回復効果についても複数の概念を踏まえてモデル化することで維持管理に対する費用対効果の評価がしやすくなると考える。

(2) シミュレーション結果

ここでは、経年低減効果に着目して、シミュレーションを行う。その際には、更生する時期について、経年が 30 年、40 年、50 年、60 年、70 年、80 年になった際に行った場合、更生の効果（経年に対してどの程度若返るかの比）については、経年をゼロにするような更生率 100% の対策をした場合の劣化ストック率の推移と回復数および更生数の変化を示したのが、図-12、図-13 である。経年が古いアメリカの方で効果が確認されやすいが、若い経年で更生することが将来の劣化ストック率に大きく影響す

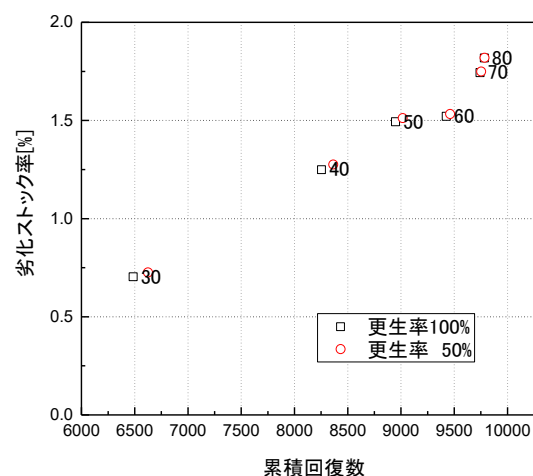


図-15 累積回復数と劣化ストック率の関係（アメリカ）

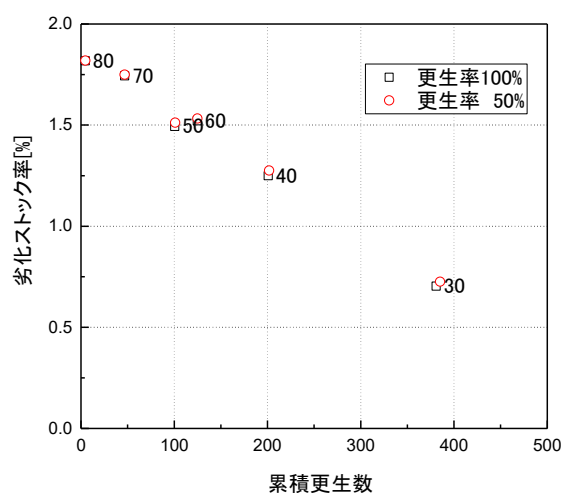


図-16 累積更生数と劣化ストック率の関係（アメリカ）

ることが見て取れる。さらに、図-14 では、更生率を、経過している経年に対して半分になる（更生率 50%）ように設定した場合の劣化ストック率の変化である。図-15 は 100 年度（2000 年）における累積回復数と劣化ストック率の関係、図-16 は累積更生数と劣化ストック率との関係であるが、更生の効果が確認できる。このような関係を利用して、現状の維持管理資源が妥当か、もしくは最適な維持管理資源はどの程度か、といった戦略の検討および評価ができる。鉄道構造物の場合では、より米国の道路橋の建設年分布に近いと考えるが、発生率や回復率の傾向やその値などを検証しながら、ストック動態分析を行うことが考えられる。

5. 結論

本研究の結論を以下に述べる。

- ・ 損傷の劣化（発生）と回復に関して、その特性として、発生は経年に対して大きくなる、回復は小さくなるなど整理した。特に発生率については取替データを利用して、ワイブル分布で表現できることを示した。

- ・代替データや既存の研究から、劣化ストックの発生率と回復率について、経年との関係を整理し、モデルで利用するための値を検討した。
- ・初期のストックの経年分布と状態分布、および発生率と回復率が得られた場合のストック動態モデルについて提案した。アメリカと日本の道路橋の経年分布を利用してモデルに適用した。
- ・提案した動態モデルを利用してシミュレーションを行い、劣化ストック率と回復連数の関係を整理した。特に回復の効果について、一般的に言われている、劣化の進展を抑制する効果だけでなく、経年を若返らせるような効果を検討して更生率として提案し、更生する時期や更生の効果（経年に対してどの程度若返るかの比）を利用してシミュレーションを行った。

参考文献

- 1) 土木学会メンテナンス工学連合小委員会：社会基盤メンテナンス工学，東京大学出版会 2004.3
- 2) 土木学会：社会インフラメンテナンス学－1. 総論編，2. 工学編，2016.2
- 3) 阿部雅人，杉崎光一，阿部允：鋼鉄道橋のストックマネジメント支援のための情報化と利活用，鉄道工学シンポジウム論文集，第19号，2015.7
- 4) 三木千壽：橋梁のアセットマネジメントとレトロフィット，JICE report，Vol.18，pp.1～17，2010.
- 5) 鉄道総合技術研究所編：鋼構造物補修・補強・改造の手引き，研友社，1992.7
- 6) 日本道路協会：道路橋補修・補強事例集（2012年版），2012.3
- 7) 山崎淳，池田甫：道路橋補修・補強事例集，オフィス・スペース，2013.5
- 8) 阿部允：実践土木のアセットマネジメント～「やりくり」で防ぐ社会資本の荒廃，日経BP社，2006.
- 9) インフラ長寿命化基本計画，http://www.cas.go.jp/jp/seisaku/infra_roukyuuka/pdf/houbun.pdf，2013.11
- 10) 阿部雅人：性能の不適合と維持管理，コンクリート工学，Vol.47，No.9，pp.133-137，2009.
- 11) 玉越隆史，大久保雅憲，渡辺陽太：道路橋の計画的管理に関する調査研究－橋梁マネジメントシステム(BMS)－，国総研資料 第523号，2009.3
- 12) 杉崎光一，貝戸清之，小林潔司：目視検査周期の不均一性を考慮した統計的劣化予測手法の構築，構造工学論文集，Vol.52A，pp.781-790，2006.3
- 13) 鋼構造の耐用性調査報告，鋼構造論文集 VOL.5 NO.39，1969，日本鋼構造協会
- 14) 橋梁の架替に関する調査結果I～IV，国土交通省国土技術政策総合研究所，道路構造物管理研究室
- 15) A.H-S.アン，W.H.タン（伊藤学・亀田弘行監訳，能島暢呂・阿部雅人訳）：改訂土木建築における確率統計の基礎，丸善，2007.
- 16) 中村剛，丹後俊郎，Cox 比例ハザードモデル，朝倉書店，2001.4
- 17) 山崎崇央，石田哲也：生存時間解析を用いた東北地方における橋梁コンクリート部材の劣化定量分析，土木学会論文集F4，Vol.71，No.4，pp.I_11-I_22，2015.
- 18) 青木一也，山本浩司，津田尚胤，小林潔司：多段階ワイブル劣化ハザードモデル，土木学会論文集，No.798，VI-68，pp.125-136，2005.
- 19) 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.857-874，2008.11
- 20) 阿部雅人，藤野陽三：システム制御理論の視点からのストックマネジメントのマクロ分析，土木学会論文集 A，Vol.65，No.2，pp.474-486，2009.
- 21) 阿部雅人：橋梁の履歴データを利用した寿命とメンテナンス効果の推定，腐食防食学会第68回技術セミナー資料，2015.10
- 22) 玉越隆史：道路橋の長寿命化対策・再生技術の現状と課題，建設リサイクル No64，pp.4-9，2013.

(2017.4.7 受付)

DYNAMIC ANALYSIS MODEL OF THE BRIDGE STOCK INCLUDING HAZARD AND RECOVERY

Masato ABE and Koichi SUGISAKI

Asset management is a method for rational and efficient stock management of social infrastructure. Asset management are able to improve the daily tasks based on quantitative values by assigning priorities for allocating resources for the purpose of improving the reliability of maintenance and maintenance work such as inspections and countermeasures. In this research, we propose a modeling method to grasp the stock dynamics of structures using inspection data etc. In the model, not only deterioration but also recovery is focused on. Regarding the characteristics of deterioration and recovery, the deterioration rate increases as structure age increases, on the other hand the recovery rate decreases as structure age which characteristic which is examined by replacement data and existing research. The model is applied to the aged distribution and the state distribution of the structure required from inspection data etc. In addition, by estimating the future stock dynamics in the case of transition in the current maintenance resources and increasing resource, it is possible to investigate optimal resources etc.