

疲労を考慮した鋼橋の維持管理計画の立案に向けて

穴見 健吾

1. 研究概要

我が国では、近年の様々な社会的・経済的背景の変化に伴う公共事業予算の縮減という経済的背景と、これまで蓄えられた膨大な社会基盤施設が更新期に入るという物理的背景のもと、これらの社会基盤施設を効率良く維持管理することが今後益々重要となる。この一つの手法としてアセットマネジメントがあり、これまで様々な視点から、また様々な段階の研究が行われてきており、開発したマネジメントシステムの中には実用に供されているものもある。社会基盤施設におけるアセットマネジメントとは、これら社会基盤施設を国民共有の資産と考え、製作・供用期間中に生じる COST と BENEFIT を考慮して、予算制約・人的制約のもと、最適な計画・設計・製作・運用（維持管理）を行うこと、また所有者である国民に対する実行プロセスの説明責任を果たすことを目的としているマネジメントシステムである。換言すれば、アセットマネジメントシステムとは、施設のライフサイクルを通じた状態、費用、便益の予測システムであり、その予測結果に基づいて合理的に、「現在何をすべきか（これは建設前でも供用後でも同じである）」という意思決定（Decision Making）の一助となるべきシステムであると考えることができる。

本研究では、特に鋼橋梁に生じる疲労を題材とし、鋼橋梁の維持管理計画の立案手法を検討することを目的としている。そこでは、維持管理における各プロセスの意味合い、すなわち施設資産維持に対する役割を忠実にモデル化することによ

り、維持管理計画を立案することを目的とする。

2. 成果目標

2.1 検査の役割のモデル化

実際の維持管理という行為の基本は検査であり、その結果をもとに、補修・補強といった行為を検討することが維持管理プロセスである。これまでの多くの研究成果により、鋼・コンクリート構造物の劣化予測技術はある程度の精度を有しており、それに基づいて構造物のライフタイムシミュレーションが可能となっている。しかし、劣化予測にある程度の精度を有する今日でも、劣化現象にはばらつきが大きく、予測結果と実際の現象には相応の乖離が存在する。従って、「劣化現象の進行には不確実性を伴い、予測通りに劣化が進行しないこともある為、不慮の事態に対して安全性を保つために中間検査を行う」として、シミュレーションの中に検査の意義を組み込む。また、そのシミュレーションにより、検査レベルや精度の持つ意義について検討する。

2.2 劣化モデルの構築

鋼の疲労現象は、基本的には着目部の疲労強度等級と外力（応力範囲と繰返し数）により支配される。実際に疲労亀裂が検査により見つかると、その形状・寸法が把握され、応力範囲（将来予測も含め）が把握できれば今後の進展予測は可能である。しかし、検査により疲労亀裂が発見できない場合、検査時点までの荷重（応力）履歴が正しく類推できないと、将来予測が非常に困難である。そこで、検査レベルと過去の履歴の推定が将来予

測に与える影響について検討する。

2.3 部材・橋梁のグルーピング

鋼橋梁には一般的に、膨大な数、膨大な種類の継手 Detail が存在し、作用する応力範囲も異なる。従って、それら一つ一つの Detail に対して照査を行うことは、非常に膨大な労力を必要とするため、橋梁構造、各ディテールの状況を考慮したグルーピングにより簡素に橋梁の疲労現象を予測できるシステムに改善する。また、一橋梁のアセットマネジメントは、橋梁網、もしくは交通網の中の一つの要素として取り扱うべきものであり、その観点における考察も加える。

2.4 維持管理計画立案システムの適用

構築したシステムを用いて、実際の鋼橋梁・及び鋼橋梁ネットワークに適用することにより、問題点を再抽出し、改善を図る。

3. 研究成果

本年度の研究の成果は、維持管理計画立案のベースとなるシステム (図-1) を作成したことにある。そこで、以下に作成したシステムの概略説明を行う。

① 構造物の劣化と品質

外力を定数として、着目部の品質 A (疲労強度) のみを確率変数として取り扱った場合、一般的に品質 A である確率は

$$P(A) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left\{-\frac{1}{2\sigma^2}(\log A - \log A_m)^2\right\}$$

$A = S_r^3 N$ であり、 S_r は応力範囲

N は S_r が作用した時の破壊までの
繰返し载荷回数

A_m は A の平均値、 σ は標準偏差

で与えられる。本システムでは、 A_m や σ が与えられている AASHTO・LRFD の疲労設計曲線を用いて、品質 A を求めている。この品質 A が与えられることにより、任意時間 T 経過後

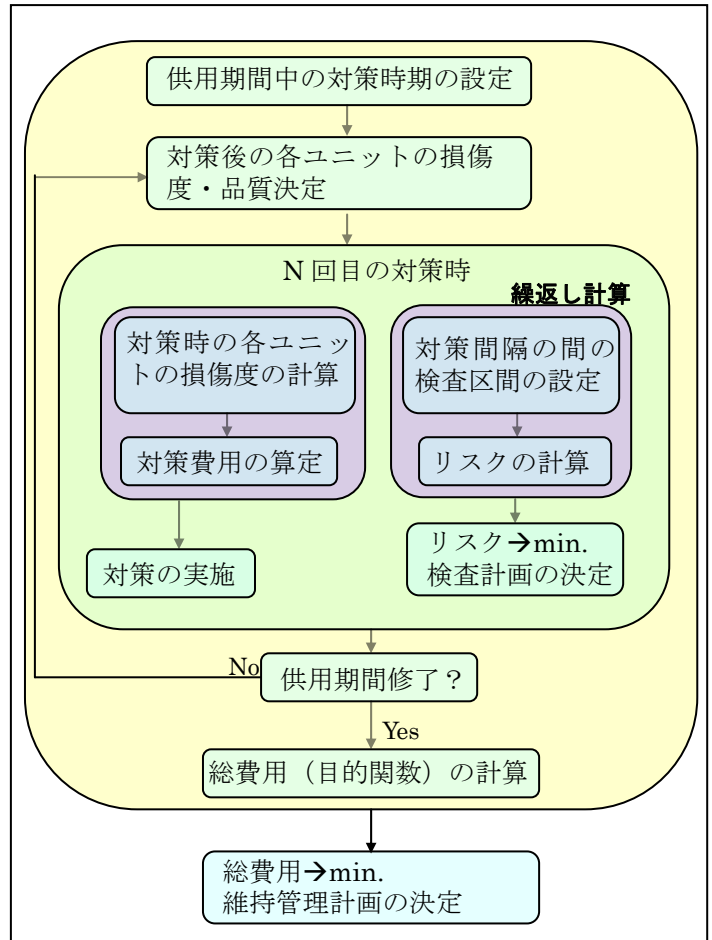


図-1 構築システムの概要
の劣化度 D (累積損傷度) は、例えば

$$D = \frac{ADTT \cdot 365 \cdot T}{A / S_r^3}$$

$ADTT$: 日平均大型車両交通量

といった式で与えられる。(ここで累積損傷度 D は D が 1 となったとき疲労破壊が生じるという意味である。)

② LCC (ライフサイクルコスト) の計算

既設鋼橋梁を対象とし、初期建設費を除くと、LCC は以下の式で与えられる。

$$LCC = \sum^{mm} \left(C_{insp} + \sum^N C_r \right) + \sum^{mm} C_{insp}$$

C_{insp} : 検査費用 C_r : ユニットの対策費用

nm : 維持管理計画内の対策回数

N : 各対策時期に対策が必要なユニット数

mm : 維持管理計画内の中間検査回数

このLCCの計算に際しては、継手の品質が平均的にばらつくとして計算をしている。(勿論、継手の品質を全て最低ランクに設定すると、中間検査は必要はないが、それが合理的かどうかは疑問であろう)。

③ 検査の意義

想定される品質の確率密度分布に従い、予測通り正確に対象部位、部材もしくは構造物の劣化が進行していく場合には、その劣化進行に併せた最適な対策(補修・補強など)計画を立案すれば良く、その間の中間検査は必要としない。この場合、劣化が予測通りに進行する為に、対策間隔内で中間検査を行うことは無駄な投資になる。実際には、予測通り対象部の劣化が進行せず、時には予測より早く、また遅く劣化が進行する可能性がある。本研究では、中間検査は予測より劣化進行の早い場合のリスク回避の為に行われていると考え、このリスクが最小となるように、中間検査を配置するプログラムを作成した。

本システムにおけるリスクの計算手法は以下の通りである。

品質の組合せ m の総数が M とし、組合せ m の出現確率を $P_r(m)$ とする。もし、 T_1 年後が最初の対策年とした場合、 T_1 年まで検査をしない場合の確率的な検査・対策費用は

$$C_{insp} + \sum_m^M \left\{ P_r(m) \left(\sum C_R(T_1) \right) \right\}$$

で与えられる。しかし、ここで時間0から T_1 の間の T_2 年に検査した時の T_1 までの確率的な総検査・対策費用は、

$$2C_{insp} + \sum_m^M \left\{ P_r(m) \left(\sum_{N_2}^{N_2} C_R(T_2) + \sum_{N_2}^{N_2} C_R(T_1 - T_2) + \sum_{N_2}^{N_2} C_R(T_1) \right) \right\}$$

ここで、 N_2 時間 T_2 年に検査し、対策を施したしユニット数であり、 N は対象総ユニット数で

ある。一つの対策区間内に複数回の検査を行う場合も上式を拡張することにより考察することができる。品質の組み合わせが、②のLCC計算に用いた品質のばらつきよりも悪い場合のみをリスク R として計上する。リスク R の計算にはモンテカルロシミュレーションを用い、このリスク R が最小となるように中間検査を配置する。

本システムでは、LCCが最小およびLCCとリスク R の総和が最小となるものを最適な維持管理計画として選定できるようにしている。

また、ここでは、検査の精度を任意に設定することにより、発見できる亀裂長さを設定した。

④ システムの試行例とシステム向上に向けて

図2に示す鋼橋梁の垂直補剛材群に対するシステムの試行結果を図-3に示す。試行条件は図-2に示す通りであるが、ここでは、簡単のため、疲労損傷のグレードが3にならないような条件のもとで試行を行った(具体的には、グレード3の補修費を非常に高額にした)。

図-3には、計算結果として、最適な中間検査、補修、補強実施計画をCOSTと補修・補強プロセス間隔におけるRiskを併せて示している。また、作用応力範囲によりグループ化した継手グループの、平均的な品質のばらつきのもとでの、損傷グレード2に存在する継手数の変化も併せて示している。(ここでは、各補修費用、検査費用は任意に設定しており、設定次第で解が異なる。そのために、今後実データを調査して検討する必要がある)

このように本システムにより、ライフタイムに応じた中間検査、補修・補強といった維持管理の最適計画を立てることができる。しかしながら、このシステムは、「この時期に中間検査を行う」といったことを説明するための結果を出すものであり、「その中間検査の結果に基づいてこの

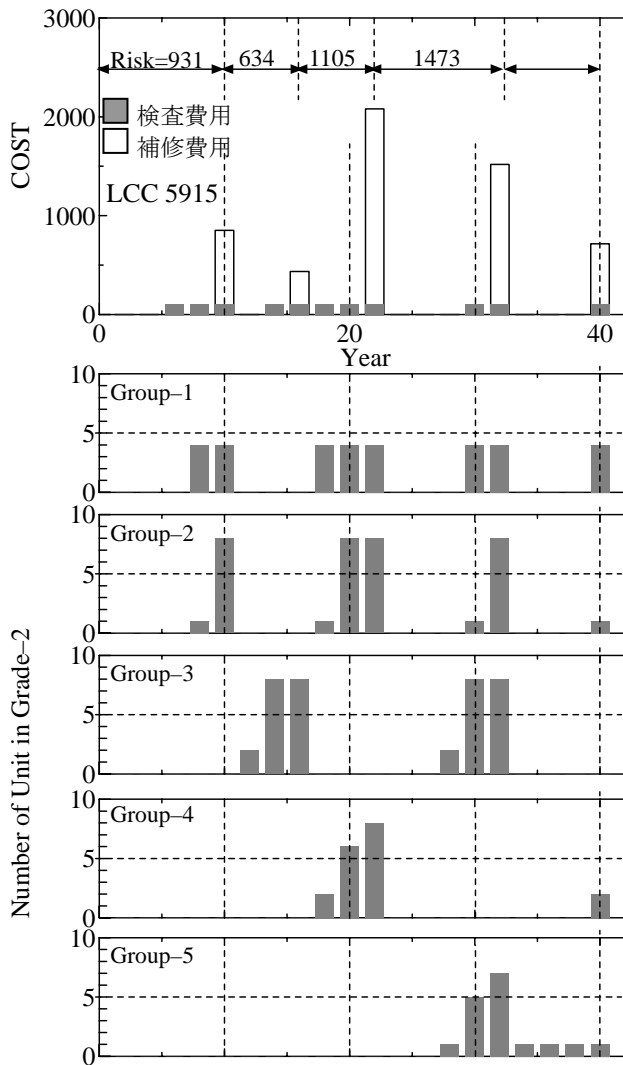
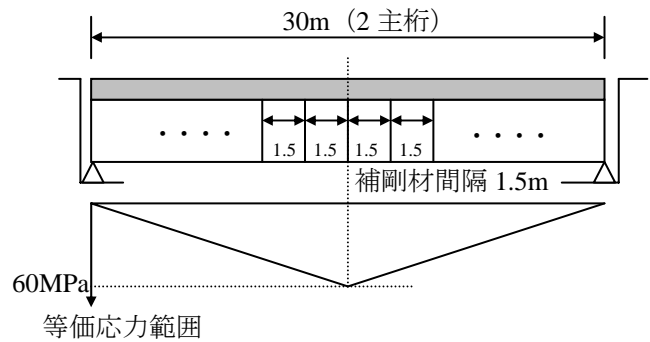


図-3 試行結果

Action を採用しなさい」というものにはなっていない。本システムで得られる最適計画の中の補修・補強対策は、平均的に品質がばらついた場合の補修、補強時期であるために、検査により得られた結果に基づいたものではなく、逆に中間検査で疲労損傷を発見した場合に、最適計画で得られた補修・補強時期までそれらの損傷に何らかの処置を施さないのであれば、中間検査の意義が無くなる。そのため、中間検査を行った場合に、想定以上の損傷が見つかった場合に、それにどのような対処を施すかという、更新型のシステムへのプログラム追加が必要となる。この点も本研究の次のステップになると考えている。

しかしながら、本システムを用いて、維持管理



| グループ | 疲労等級 | S_r | ユニット数 |
|------|------|-------|-------|
| 1 | C | 60 | 4 |
| 2 | C | 54 | 8 |
| 3 | C | 48 | 8 |
| 4 | C | 42 | 8 |
| 5 | C | 36 | 8 |
| 6 | C | 30 | 8 |
| 7 | C | 24 | 8 |

$$S_r \geq \sqrt[3]{\frac{A_m D_{lim}}{ADTT \cdot 365 \cdot T}} \approx 32(MPa)$$

よりグループ 6 まで対象とした。
但し、ADTT=1500 台、計画期間 T=40 年
 $A_m=1.91337 \times 10^{12}$ である

| 損傷グレード | 損傷度 | 補修 Cost |
|---|-----------------------|---------|
| Grade-1 | $0 < D < D_{lim}$ | --- |
| Grade-2 | $D_{lim} < D < 0.8$ | 60 (Cr) |
| Grade-3 | $0.8 < D < 1.0$ | 100000 |
| Grade-4 | > 1.0 | 100000 |
| 検査費用 | 52 Dlim (発見可能損傷度) 0.4 | |
| 複数補修の場合の Cost = $0.2 \times (n-1)Cr + Cr$ | | |
| Grade3,4 の補修費はそのグレードに損傷が入らないように非常に高額にした | | |

図-2 試行対象と試行条件

における検査の意義を明確にすることができたと考えている。

4. 教育

平成 17 年度において予定している、本研究に関連する学士論文テーマは以下の通りである。

「鋼橋梁の検査の意義：維持管理計画の立案」

「検査結果に基づいた次の Action の決定」