

鋼橋の劣化度予測における信頼性解析の適用について

Study on Application of Reliability Analysis for Prediction of Damage Level on Steel Bridge Structures

北海道大学大学院工学研究科 正員 小幡卓司 (Takashi Obata)
 北海道大学大学院工学研究科○学生員 倉戸 亮 (Ryo Kurato)
 北海道大学大学院工学研究科 学生員 井田俊輔 (Syunsuke Ida)
 北海道大学大学院工学研究科 F会員 林川俊郎 (Toshiro Hayashikawa)
 北海道大学大学院工学研究科 F会員 佐藤浩一 (Koichi Sato)

1. まえがき

わが国における交通社会資本の整備は、昭和40年～50年代のいわゆる高度経済成長期に数多く行われてきた¹⁾。今日においては、これらの社会基盤構造物は壮年期にあると考えられ、その老朽化は以前のように無対策で経緯すれば急速に進むことが予測されている。社会資本の充実に伴い、資本投資の効率性や環境に関する市民意識の高まりと、投資余力そのものの減少から、新たな道路ネットワークの形成を目指すような開発的投資は次第に困難となりつつあり、既設の交通社会資本の有効利用・維持管理が今後ますます重要視されることは自明である。

このような社会情勢の中で、交通基盤構造物をとりまく現況に着目すると、車両等の大型化、交通量の飛躍的な増大等の影響を受け、その劣化もある程度進行している可能性が極めて高いと考えられる。効率的な維持管理を行うためには、対象となる構造物の現時点の損傷状況、劣化予測に基づいた余寿命評価、ならびに点検・補修回数とライフサイクルコスト(以下、LCCと称す)の関係を求めた上で、それらを総合的に検討する必要がある。そのためには、ある程度正確な劣化曲線の算定が不可欠であるが、いわゆる確定論的な手法のみではこの種の解析は困難であると考えられ、なんらかの確率論的解析法を導入することが有効であると思われる。中でも、信頼性解析は、一般の設計法における安全性が最大とみなされる荷重と最小とみなされる耐力の比によって判断されるのに対して、信頼性理論²⁾ではこの荷重と耐力がばらつきをもつ確率量であるとして、両確率変数から構造物の信頼性指標を示すことにより、実現される性能の程度を明らかにすることが可能である。

以上より、本研究においては信頼性解析を用いて橋梁をはじめとする鋼構造物の劣化予測と、LCCの両者を同時に最適化することが可能となるような手法に関して基礎的な検討を行うことを目的とする。鋼構造物の経年劣化の要因は各種知られているが、近年では冬期間における融雪剤の大量散布が問題になりつつあることから、本研究では腐食による劣化を対象とすることとした。また、コストに関しては、初期投資、点検・補修の費用に加え、供用中に通行止め等が生じた際に失われるコストも算定する。これらのパラメータに対して、信頼性理論に基づいたイベントツリー解析を適用し、維持管理に関するマネジメントシステムへの適用可能性あるいは有効性等に関して考察を試みるものである。

2. 構造部材の信頼性評価

確率手法に基づく信頼性理論においては、荷重 S と耐力(抵抗力) R がある確率分布に従う、ともに独立な確

率変数であるとする。構造物が限界状態を超えるのは、荷重が耐力を上回る場合であり、その確率は次式のように表される。

$$p_f = P(S > R) = P(S - R > 0) \cdots \cdots (1)$$

式(1)において、 P_f は限界状態を超える確率(以下、破壊確率と称す)である。

ここで、それぞれの確率変数に対して $R: N(R_0, \sigma_r)$ 、 $S: N(S_0, \sigma_s)$ なる正規分布を考える。さらに、 $Z = R - S$ とくと、 Z も正規分布($Z: N(Z_0, \sigma_z)$)となる。

$$Z: N(Z_0, \sigma_z) = N(R_0 - S_0, \sqrt{\sigma_r^2 + \sigma_s^2}) \cdots \cdots (2)$$

Z は信頼性理論では性能関数と呼ばれ、設計上は安全性の余裕を表し、その確率量が重要となる。これは $P(Z < 0)$ なる破壊確率で、次式のように表される。

$$p_f = P(Z < 0) = 1 - \Phi\left(\frac{Z_0}{\sigma_z}\right) \cdots \cdots (3)$$

ここで、 Φ は平均値0、標準偏差1の標準正規確率分布関数である。

次に、平均値 Z_0 が破壊点($Z=0$)から σ_z の何倍隔たっているかを表す信頼性指標 β を定義する。

$$\beta = \frac{Z_0}{\sigma_z} = \frac{R_0 - S_0}{\sqrt{\sigma_r^2 + \sigma_s^2}} \cdots \cdots (4)$$

β をこのように定義すると、破壊確率 p_f は次式のように簡潔に示すことができる。

$$p_f = 1 - \Phi(\beta) \cdots \cdots (5)$$

耐力 R や荷重 S の確率密度関数は用いずに、これらの平均値と分散を用いて破壊確率 P_f を求める方法は二次モーメント法と呼ばれている。この手法では P_f を直接求めるのではなく、 P_f に対応した信頼性指標 β を用いることにより、簡便に構造部材の安全性を照査することが可能であり、本研究ではこの手法を用いて構造物の劣化予測を行うこととした。

3. 解析手法

3.1 鋼材の腐食と劣化モデル

鋼構造物の経年劣化に関わる要因としては、腐食、疲労に起因する損傷からの剛性低下、材料そのものの劣化など多数挙げられる。昭和61年から平成8年までの10年間についての鋼橋の架け替えに関するデータによると、架け替えの理由としては改良工事や機能上の問題が大部分を占めており、続いて上部構造の損傷が12%となっている³⁾。この上部構造の架け替え理由の内訳は、鋼材の腐食が26%を占めており、腐食は鋼構造物にとって最も

重大な問題の一つであると考えられる。

以上のことを踏まえて本研究では、鋼材の腐食に着目して構造物の耐力の経年劣化を考えることとした。構造物部材の耐力が環境要因によってのみ経年劣化する場合、時刻 t における部材耐力 $r(t)$ は次式のように表される⁴⁾。

$$r(t) = r_0 \cdot g(t) \cdots \cdots (6)$$

ここで、 r_0 は初期の部材耐力、 $g(t)$ は劣化関数である。劣化関数とは、腐食など環境要因により劣化する耐力の経年変化を考慮した関数であり、一般に次式のようにモデル化することができる⁵⁾。

$$g(t) = 1 - a \cdot (t - T_i)^b \cdots \cdots (7)$$

ここで、 T_i は劣化の開始時刻、 a は劣化の進行速度を表すパラメータ、 b は劣化の原因となる環境要因に依存するパラメータである。本研究では、 $T_i = 0$ 、 $b = 1.0$ と設定している。また劣化の進行速度 a に起因する腐食の進行速度の目安としては、普通の鋼材を大気中に放置した場合、穏やかな環境下では 0.05 mm/year 、海岸地域などの厳しい環境下では 0.2 mm/year に達することがある⁶⁾。腐食については一般に補修が可能であり、信頼性解析を行う際に補修後の部材耐力も考慮した劣化予測を行う。

3. 2 検査・補修とイベントツリー解析

構造物は、通常、時間経過に伴って発生する損傷により劣化する。これらの維持管理においては、まず損傷状態を正確に把握することが重要である。すなわち構造物の基本的な安全を確保し、維持管理していくためには構造物の性能検査が必要不可欠である。この検査方法は、各種のものが知られているが、本研究においては非破壊検査を用いることを仮定する。非破壊検査には、放射線透過検査、超音波探傷検査、磁粉探傷検査、浸透探傷検査、渦流探傷検査などさまざまな検査方法があるが、それぞれその検査方法によって検査能力は異なると考えられる。検査のコストについては、一般に検査能力が高いものほどそのコストも高く、劣化の進行速度や LCC との関係から適切な検査方法を選択する必要がある。

検査によって損傷が発見されれば、補修・補強の対策を速やかに講じることが構造物の劣化防止と安全確保には不可欠である。しかしながら、非破壊検査で全ての損傷を発見することは不可能であり、その物理的な損傷の度合い η (以下、損傷度と称す) や検査技術の質による損傷を発見する確率 $d(\eta)$ (以下、損傷検出度と称す) を考慮する必要がある。本研究では、この損傷度と損傷検出度を、それぞれ次式のように表現する⁷⁾。

$$\eta(t) = \frac{D_0 - D(t)}{D_0} \cdots \cdots (8)$$

$$d(\eta) = \begin{cases} 0 & (0 \leq \eta \leq \eta_{\min}) \\ \Phi\left(\frac{\eta - \eta_{0.5}}{\sigma}\right) & (\eta_{\min} < \eta \leq \eta_{\max}) \\ 1 & (\eta > \eta_{\max}) \end{cases} \cdots \cdots (9)$$

ここで、 D_0 は竣工時の主桁鋼板の板厚、 $D(t)$ は供用後 t 年における板厚、 $\eta_{0.5}$ は損傷検出度が 50% とした場合の発見し得る損傷度の平均値 (検査精度を表わす)、 η_{\min} 、 η_{\max} は検査により発見し得る最小・最大の損傷度を表わしている。本研究では $\eta_{0.5}$ を 0.05, 0.10, 0.15 の 3 種類に設

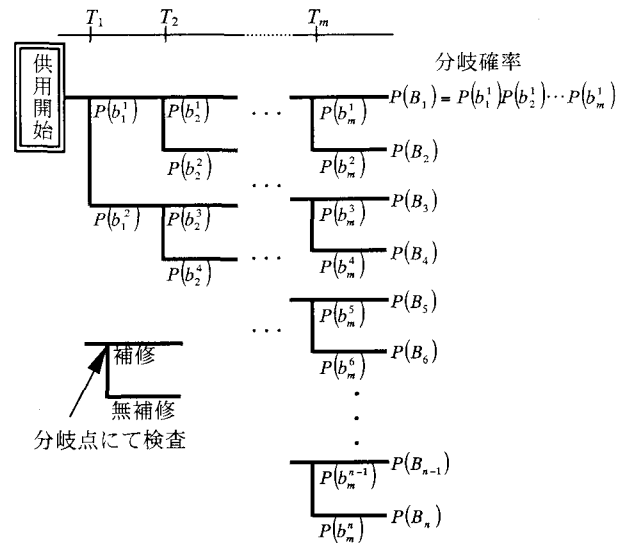


図-1 イベントツリー図

定して、多数存在する検査時における補修の有無の組み合わせパターンについて、イベントツリー解析を用いることとした。

イベントツリー解析とは、ある事象が発生した時、イベントツリーと呼ばれる樹状図を用いて、事象が発生する確率、ある事象が次の事象に分岐する確率を与えることにより、その進行を時系列に解析し、最終的な事象の発生確率を評価する手法である。また事象そのものの発生確率を用いて、社会的な損失コストを関連づけて算定することが可能である。本研究では、イベントツリーを構築するにあたり、図-1 に示すように各分岐点においては検査の実施を想定し、そのときの補修の有無についての分岐確率は、式(9)に示した損傷検出度を、また事象の発生確率については、信頼性理論により算定した破壊確率 P_f を用いた。構造物の供用期間における検査回数を m 回とすると、イベントツリーの分岐は 2^m ($=n$) 通りになり、その全ての補修の組み合わせパターンについて信頼性解析を行う。

3. 3 ライフサイクルコストの最適化

ライフサイクルコストは、一般には初期コスト、メンテナンスコスト、検査コスト、修理コスト等の和であるが、前述のとおり、本研究では構造物が供用中に限界状態を超過した場合に社会的に失われるコストも考慮することとする (以下、破壊コストと称す)。この破壊コストについては、例えば 1 日あたりのユーザーコストと、信頼性解析で求められた破壊確率の積で評価する。本研究におけるトータルコストの算定式は以下のとおりである。

$$C_T = C_I + C_{PM} + C_{INS} + C_{REP} + C_F \cdots \cdots (10)$$

ここで、 C_T はトータルコスト、 C_I は初期投資、 C_{PM} は定期点検にかかる費用、 C_{INS} は検査費用、 C_{REP} は補修にかかるコスト、 C_F は破壊コストである。本研究では、 C_I は 100 と設定した。その他のコストは、次式に示すように簡単にモデル化する⁷⁾。

$$C_{PM} = \sum_{i=1}^{98} C_{pm} \cdot t \cdots \cdots (11)$$

$$C_{INS} = \sum_{i=1}^m \alpha_{ins} (1 - \eta_{min})^{20} \dots \dots \dots (12)$$

$$C_{REP} = \sum_{i=1}^{2^n} C_{rep,i} P(B_i) \dots \dots \dots (13)$$

$$C_{rep,i} = \sum_{j=1}^m \alpha_{rep} e_{rep,i}^{0.5} \dots \dots \dots (14)$$

$$C_F = \sum_{i=1}^{2^n} p_{f,i} P(B_i) C_f \dots \dots \dots (15)$$

式(11)の定期点検については供用期間中、2年に1回行うものとして、1回あたりの点検コスト C_{pm} は C_f に 0.001 を掛け合わせた値と仮定して、 C_{pm} と定期点検を行う年数 t を用いて表わす。なお、供用期間 t は 100 年に設定した。式(12)の基本検査コスト α_{ins} は、 C_f に 0.07 を掛け合わせた値と仮定して、 α_{ins} と検査により発見し得る最小の損傷度 η_{min} を用いて検査の質とコストの関連付けを行った。式(13)は、イベントツリーにおいて i 番目の発生事象における補修コスト $C_{rep,i}$ を式(14)から求め、 i 番目の発生事象への分岐確率 $P(B_i)$ との積を合計することで表現する。ここで、式(14)は、 C_f と等しいと仮定する取り替えコスト α_{rep} と補修前後の部材耐力から求められる補修の度合いを表わす指標 e_{rep} から算定される。式(15)の破壊コストについては、 i 番目の発生事象における破壊確率 p_f の最大値、 i 番目の発生事象への分岐確率 $P(B_i)$ 、そして構造物が供用中に限界状態を超過した場合に社会的に失われるコスト C_f を用いて表わすことができる。なお、 C_f は C_f に 500 を掛け合わせた値と仮定した

社会基盤構造物の効率的な維持管理のためには、このライフサイクルコストを最小化する必要がある。本研究では構造物の信頼性を維持するという条件の下、ライフサイクルコストの最小化を行うため、以下のような目的関数と制約条件を設定することとした。

目的関数 $\min C_T \dots \dots \dots (16)$

制約条件 $\beta_{life} \geq \beta_{life}^* \dots \dots \dots (17)$

ここで、 β_{life} は構造物の耐用年数の間における信頼性であり、 β_{life}^* は許容信頼性(使用限界状態)を表している。

以上より、許容信頼性を下回らないよう構造物の性能を維持しながら、ライフサイクルコストを最小とすることにより、最適な維持管理計画の意思決定支援について検討を加えるものである。

4. 維持管理計画シミュレーション

本研究で用いる信頼性解析手法について、橋梁構造物に対する適用性を検討するために、橋梁の構造形式としてもっとも一般的なものの一つである鋼鈹桁橋を対象とした信頼性解析を行う。

鋼鈹桁橋の解析モデルの構築は、一般国道等に架かる中規模の橋梁を想定して、道路橋示方書(平成14年改訂版)⁸⁾に基づいて行うこととした。解析対象の橋梁は支間長 35m、幅員 11.8m の連続非合成鈹桁橋として、図-2 ならびに表-1 のような橋梁構造物を想定した。

解析条件として、前述のとおり耐用年数は 100 年、初期コストは 100、検査間隔は耐用年数を検査回数で除した一定値として取り扱った。解析ケースは表-2 に示すように、鋼材の腐食率については、今回 0.05mm/year、

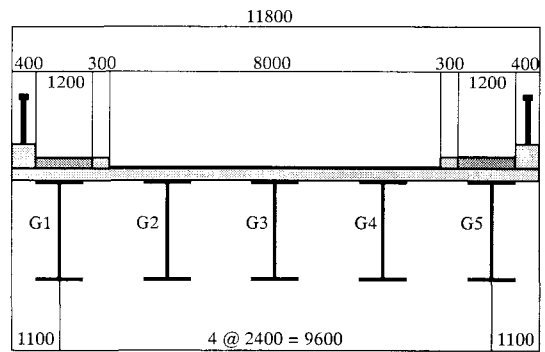


図-2 3径間連続5主桁橋断面図(mm)

表-1 鈹桁橋の諸元

形式	連続非合成鈹桁	
支間長	35m	
幅員	11.8m	
床版厚	22cm	
主桁断面	上フランジ	520×25mm
	下フランジ	470×25mm
	ウェブ	1850×9mm

表-2 解析ケース

	腐食率	検査精度
Case1	0.005 mm/year	$\eta_{0.5}=0.05$
		$\eta_{0.5}=0.10$
		$\eta_{0.5}=0.15$
Case2	0.010 mm/year	$\eta_{0.5}=0.05$
		$\eta_{0.5}=0.10$
		$\eta_{0.5}=0.15$
Case3	0.020 mm/year	$\eta_{0.5}=0.05$
		$\eta_{0.5}=0.10$
		$\eta_{0.5}=0.15$

0.1mm/year、0.2 mm/year の 3 種類、また検査精度 $\eta_{0.5}$ については精度の高いものから 0.05, 0.10, 0.15 として、合計 9 パターンの解析を行うこととした。なお、許容信頼性指標は、 $\beta_{life}^* = 3.72$ に設定した。

解析結果としては、検査回数に応じたトータルコストの変化と、その際の構造物の劣化曲線が得られる。それぞれのケースにおける、トータルコストとコスト最小の場合の維持管理計画における劣化曲線を、図-3 ならびに図-4 に示す。まず、非破壊検査における検査精度については Case1、Case2 で 0.10、また Case3 においては 0.15 を用いた維持管理計画が最適であると選定された。検査精度が良好なものはそのコストも高く、Case1、Case2 においては、劣化速度と LCC の関係からある程度の検査精度を有していれば十分であるとの結果が得られ、一般的感覚では理解しやすい解となっている。また、Case3 においては、厳しい環境を想定した腐食率で解析を行っているため、検査精度の低いものでも容易に損傷を発見し得ることから、最適維持管理にコストが最も低い検査精度 0.15 が選定されたと考えられる。次にそれぞれのケースにおける検査・補修回数については、Case1 で許容信頼性を維持し得る最小の補修回数は 2 回であり、検査

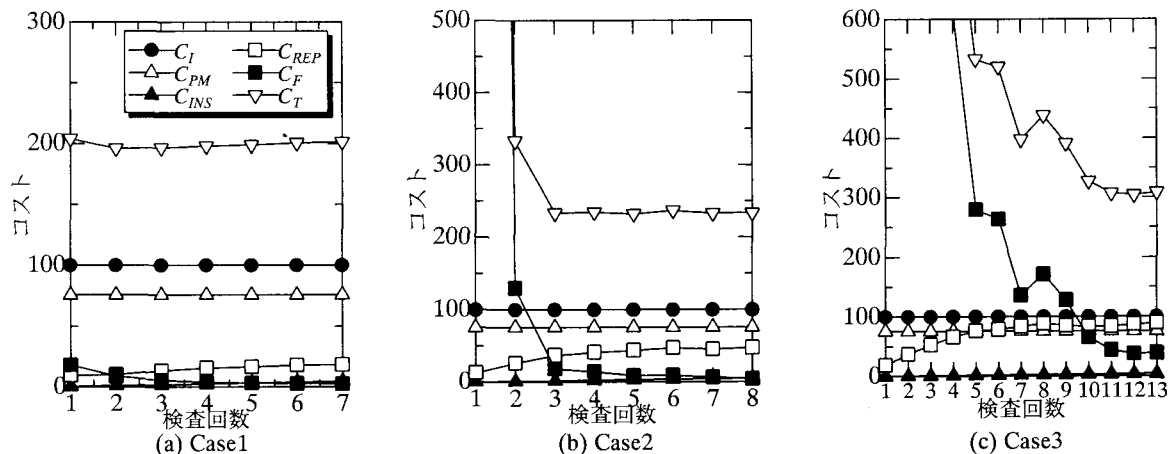


図-3 検査回数とトータルコストの比較図

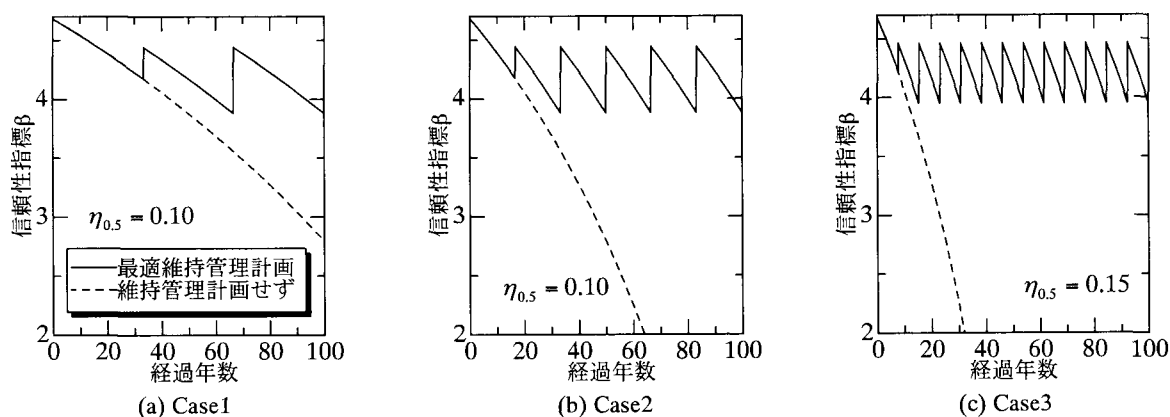


図-4 最適維持管理計画による劣化曲線

2回・補修2回するときLCCが最小という結果が得られた。また、Case2においては最小補修回数4回、Case3においては最小補修回数10回で許容信頼性を維持し得るのだが、最小回数以上の補修を行い構造物の破壊確率を低減させることで、破壊コストを抑え、すなわちトータルコストを抑え得るという結果が得られ、Case2、Case3それぞれ検査5回・補修5回、検査12回・補修12回を最適維持管理と選定している。このことは、大規模な補修による通行止め等の発生を最小限に抑えることがLCC縮減に効果的であると推定される。以上の結果より、本研究の手法ではLCCと劣化曲線の双方が得られ、それらを同時に最適化することが可能であり、維持管理システムへの十分な適用性を有するものと思われる。

5. あとがき

以上のように、本研究では信頼性解析に基づいて、鋼構造物における鋼材の腐食を対象とした劣化度予測ならびにLCC評価を行い、両者を同時に最適化することにより、維持管理に関するマネジメントシステムへの適用可能性あるいは有効性等に関して考察を加えたものである。解析結果からは、トータルコストの比較を行うことにより容易に最適維持管理計画の選定が可能であり、またその際に用いられる適切な検査方法の選定も可能であることから、本研究の手法は維持管理システムへの十分な適用可能性を有することが判明した。また今回は鋼材の腐食を対象とした信頼性解析を行ったが、疲労等の他の要因についても考慮すれば、劣化予測およびLCC評価の

精度向上を図ることが可能であり、供用開始時のパラメータと劣化関数を与えることにより、既存の社会基盤構造物に対しても適用する可能性を有すると考えられる。

【参考文献】

- 1) 西川和廣：道路橋の寿命と維持管理，土木学会論文集，No.501/I-29，pp.1-10，1994.
- 2) 吉川弘道：鉄筋コンクリートの解析と設計 限界状態設計法の考え方と適用，丸善，1995.
- 3) 西川和廣，村越潤，上仙靖：橋梁の架替に関する調査結果(Ⅲ)，土木研究所資料第3512号，1997-10
- 4) Mori, Y. and Ellingwood, B. : Reliability-Based Service-Life Assessment of Aging Concrete Structures, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.119, No.5, pp1600-1621, 1993.
- 5) Clifton, J. R. and Knab, L. I., : Service life of concrete, National Bureau of Standards. NUREG/CR5466, 1989.
- 6) 大井謙一：鉄骨造について，建築雑誌，Vol.117, no. 1494, pp.18-19, 2002.
- 7) Frangopol, D.M., Lin, K.-Y., and Estes, A. C. : Life-Cycle Cost Design of Deteriorating Structures, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.123, No.10, pp1390-1401, 1997.
- 8) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅰ共通編，Ⅱ鋼橋編，2002.