U.D.C 624.591.2

鉄道土木構造物の定期検査結果を活用した劣化予測

畑中　達郎*　　佐竹　亮一郎*　　早川　健司**

要　約：　鉄道土木構造物では，2年に1回の定期検査が義務付けられており，長年にわたり検査結果が蓄積されているが，過去の検査履歴は十分有効活用されていないのが現状である。この検査結果を用いた劣化予測が可能になれば，効率的かつ効果的な維持管理計画の検討に活用できる可能性がある。そこで，道路トンネル覆工を対象とした既往の劣化予測手法を用いて，鉄道土木構造物の1つであるボックス型RCトンネルを対象にし，劣化予測を行った。その結果，既往の劣化予測手法が鉄道土木構造物の検査結果に適用できることを確認した。また，予測結果は，補修工事の順序や平準化など，効率的，効果的な維持管理計画策定の基礎資料として活用可能と考えられた。

ｷｰﾜｰﾄﾞ：　定期検査データ，維持管理，劣化予測，モンテカルロシミュレーション

目　次：

1. はじめに
2. 劣化予測方法
3. 実検査結果を用いた構造物毎の劣化予測
4. 予測結果と実検査結果の比較
5. おわりに

1. はじめに

鉄道の安全運行および第三者災害の防止のためには，鉄道施設の定期検査は不可欠であり，2年に1回の定期検査が義務付けられている。

検査により構造物の健全度がグレーディング法により評価されており，AA，A1，A2，B，C，Sランクまでの6ランクに区分される。健全度AAやA1は，正常な列車運行を脅かす恐れのある変状とされ，早急に措置がされる。一方，健全度A2は，将来その変状が構造物の性能を低下させるものとされており，早急な措置が必要ではないものの，放置するとAAやA1になる可能性があるため，順次措置がされている。この健全度による評価は，構造物全体を1つの健全度で評価するのではなく，構造物に発生した劣化事象1つに対して行われることから膨大な量の検査結果が蓄積される。

この検査結果は，様々な補修工事の計画・施工の基礎データとなり，鉄道事業者においては，補修箇所の選定や計画に用いられている。しかしながら，過去の検査履歴までは十分有効活用されていないのが現状である。

そこで，道路トンネル覆工等を対象に検討されている確率微分方程式を用いた劣化予測手法を鉄道のボックス型RCトンネルに適用し，検討を行った。なお，本報告は，既発表の文献[1]に一部加筆しまとめたものである。

2. 劣化予測方法

2.1　概要

今回，用いた劣化予測モデルでは，ポアソン型確率微分方程式により，ばらつきを含む既往の点検データを数値化し，モンテカルロ法によるシミュレーションから確率分布関数を求める。この方法は，既往の論文[2]において，供用年数および点検間隔の異なる162本の道路トンネル覆工の検査結果を用いて劣化予測モデルの構築が行われている。図1に概要を示す。検査結果は黒丸，劣化予測モデルによる予測が実線であり，劣化予測モデルにより劣化過程が再現されている。今回，対象としたのは鉄道土木構造物の1つであるボックス型RCトンネルであり，同じ供用年数で，点検結果についても一定間隔であることが相違点である。

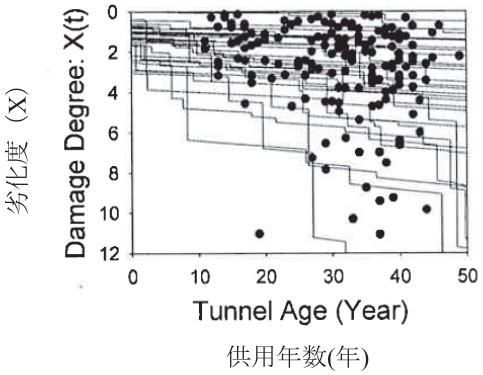

図1　トンネル覆工を対象とした劣化予測モデル[2]

2.2　劣化予測モデル

本節では，用いた劣化予測モデルについて，概要を示す。時間tにおける劣化度を$X(t)$とすると，劣化度の時間的成長（増加）について，以下の式で表される。

$$dX(t)/dt = \{\mu o(t) + Z(t)\}\, g(X(t)) \qquad (1)$$

$g(x)$：劣化度xのときに劣化成長速度を与える形状関数
$\mu 0(t)$：平均的時間成長係数

＊技術研究所　社会基盤技術研究部　土木材料・地盤グループ　　＊＊技術研究所

$Z(t)$：駆動雑音（平均が 0 の確率過程）

丸山ら[2] は，劣化度について，時間の推移により維持または増加し（減少はしない），かつ不定期に大きく劣化度が増進するという性質を仮定し，不規則な劣化成長を与えるために複合 Poisson 過程 $C(t)$ を駆動雑音に用いている。

$$C(t)=\sum_{k=1}^{N(t)} Yk \qquad (2)$$

$N(t)$：強度 λ の Posion 過程

λ：Poisson 過程の強度を表す定数

$\{Yk\}_{k=1,2,\cdots}$：互いに独立で同一分布に従う確率変数

複合 Poisson 過程において，ジャンプ（劣化度の急激な増加現象）の平均値 $E[Yk]=q_1$ とすると，平均は式(3)となる。

$$E(C(t))=\lambda q_1 t \qquad (3)$$

駆動雑音 $Z(t)$ の平均値は 0 であるため式(4)となり，劣化予測モデルとなる式(5)が得られる。

$$Z(t)=C(t)-\lambda q_1 t \qquad (4)$$

$$dX(t)=\{(\mu_0(t)-\lambda q_1)\}X(t)dt+X(t^-)dC(t) \qquad (5)$$

ここで $\mu_0(t)=\mu_0$ とすると，Poisson 型劣化予測モデルの解として式(6)が得られる。

$$X(t)=X(0)\exp\{(\mu_0-\lambda q_1)t\}\prod_{k=1}^{N(t)}(1+Yk) \qquad (6)$$

$X(0)$：初期値

$\exp\{(\mu_0-\lambda q_1)t\}$：劣化の平均的成長

$\prod_{k=1}^{N(t)}(1+Yk)$：劣化の不規則な成長

劣化の不規則な成長が発生するまでは，常に劣化が進行するモデルとなっており，劣化度の成長に伴い，劣化の不規則な成長による変動も大きくなる。平均値と分散は，式(7)，(8)となる。

$$E[X(t)]=X(0)exp\{\mu_0 t\} \qquad (7)$$

$$Var[X(t)]=X(0)^2 exp\{2\mu_0 t\}(exp\{\lambda q_2 t\}-1) \qquad (8)$$

μ_0：平均的時間成長係数

$q_2=E[Yk^2]$：ジャンプの 2 次モーメント

以上の定式化に基づき，実データより期待値，分散の時間的モデルを規定する係数及び Poisson 過程の強度 λ を設定し，モデル化を行う。なお，紙面の都合上，これら係数の設定の方法の具体は文献[2] を参照いただきたい。

2.3 劣化予測手順

劣化予測のフローを図 2 に示す。

①検査結果の点数化

劣化予測を行うには，記録されている検査結果を数値に変換する必要がある。点数化の例を表 1 に示す。

定期検査結果は，一つの変状に対して，A～C の各健全度が判定されている。健全度が同じであっても，変状の発生部位や種類によって，列車運行へ及ぼす影響は異なるため，点数化にあたっては，その項目の重要度や影響を考慮した重み付けした点数を設定する。また，点数化を行った項目は，それぞれを加法，乗法などにより任意の劣化度（点数化）とし，構造物単位で集約する。

表 2 に点数化後のデータ例を示す。ここでは，劣化部位，変状，健全度の 3 つに対して重み付けを行い，それらを乗じて，合計したものを構造物の劣化点数とした。

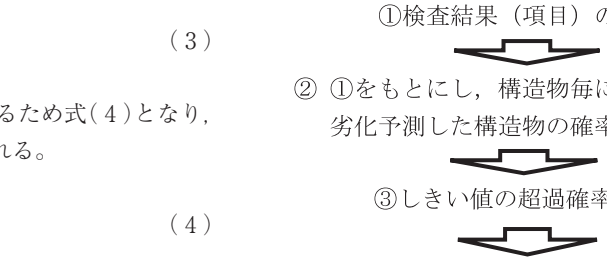

図 2 劣化予測のフロー

表 1 重み付けされた点数例

変状種別	点数
イ	10
ロ	5
ハ	3
ニ	0.1
…	…

変状部位	点数
A	10
B	5
C	2
D	1
…	…

健全度	点数
A2	10
B	5
C	3
S	0

表 2 点数化されたデータ例

構造物	検査年											
	1				2				3			
	部位	変状	健全度	合計	部位	変状	健全度	合計	部位	変状	健全度	合計
A	5	5	5	125	10	10	10	1125	10	10	10	2125
	—	—	—		5	5	5		10	10	10	
	—	—	—		—	—	—		5	5	5	
…	…				…				…			

②確率密度関数の算出

本劣化予測では，モンテカルロシミュレーション（MCS）と呼ばれる乱数解析手法を用いた。MCS はある確率変数について，（疑似）乱数による多数の解析を行い，確率分布を求める手法である。本報告においては，2.1 で示したモデルに則り，ある構造物の劣化点数の推移を求める行為が MCS の 1 試行であり，この試行を繰り返し行うことで，任意の時間 t における確率分布 P（t）を求める（図 3）。文献 2）より確率分布 P（t）は，対数正規分布で

近似可能と報告されており，本報告でも同様に取り扱うこととした。

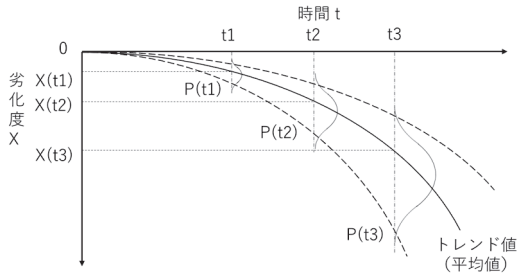

図 3　劣化予測概要

③しきい値の設定と超過確率の算出

構造物毎の確率密度分布に対し，任意のしきい値を設定し，しきい値に対する超過確率を算出する。経過時間 t 年における劣化度の確率密度分布としきい値の概念図を図 4 に示す。しきい値の設定には，NEL（損失の期待値），PML（予想最大損失）等の他，対象とする問題の性質に合わせ，任意の数値を選定することができる。NEL および PML は，地震リスク評価で使われる指標であり，確率密度分布の面積比が 0.5：0.5，0.9：0.1 となる値である。例えば，NEL の値をしきい値とした場合は PML よりも安全側の管理となる。

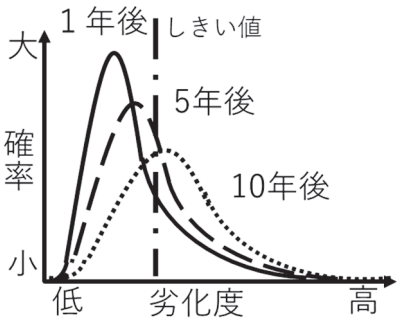

図 4　劣化度の確率密度分布

3. 実検査結果を用いた構造物毎の劣化予測

試算条件を表 3 に示す。対象構造物はボックス型 RC トンネルであり，トンネル延長 10 m を 1 つの構造物と見なし，119 区間について，2008～2020 年に実施された 13 回の実検査結果を用いて，今後 10 年までの劣化予測を行った。今回，点数化の対象としたものは，変状種別と変状の発生部位，健全度の 3 つであり，それぞれの点数は 0～10 点を設定し，この 3 つの点数を乗じることにより劣化点数を算出した。劣化点数のしきい値は，重みの高い部位（10 点）に列車運行等への影響が大きい変状（剥離等：10 点）が健全度 A2（10 点）の 3 つを乗じた，劣化点数 1000 点とした。

また，補修の想定を行い，補修無しと有りの 2 パターンを試算した。補修有りでは，補修対象となる区間と補修量を仮定し，劣化順位 1～10 位の区間は，大規模補修を想定し，劣化点数（3600～6500 点）の 70%，劣化順位 11～20 位は，変状をいくつか補修する中規模補修を想定し，劣化点数から 2500 点分を減じた。劣化順位 21 位以降は補修をしないとした。

予測の試行回数は，確率分布の平均，標準偏差の変動が一定値になる様，5000 回/構造物とした。

表 3　劣化予測の条件

対象構造物	ボックス型RCトンネル	
使用データ	過去13年(13回分)の検査結果	
予測年数	10年	
しきい値の設定	Σ(変状種別×変状部位×判定結果)=1000点	
補修シナリオ	補修なし	・全ての劣化順位 補修はしない
	補修あり	実施時期: 1年毎に1区間 ・劣化順位1～10位の区間(大規模補修) 補修量: 劣化点数から70%を減じた ・劣化順位11～20位の区間(中規模補修) 補修量: 劣化点数から 補修点(2500点)を減じた ・劣化順位21位以降 補修はしない

①補修無しのパターン

しきい値を超える超過確率と予測年数の関係を図 5 に示す。劣化順位 1-20 位では，劣化点数が 1000 点以上であり補修しないため，しきい値の超過確率は 1 年目から 1 となる。一方，劣化度の低い区間（88，99 位）は，経年により劣化度が増加し，超過確率が増加している。また，入力値となる劣化点数の経時変化は構造物毎に異なるため，劣化進展の速度に差が生じ，劣化順位の入替りが発生した。

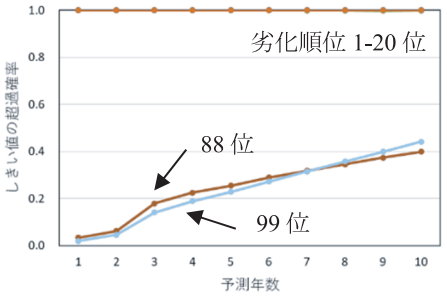

図 5　しきい値の超過確率（補修無し）の一例

②補修有りのパターン

補修有りにおける予測年数としきい値を超える超過確率の関係を図 6 に示す。これによると，劣化順位 1～10 位で，1 年に 1 か所ずつ大規模補修をする想定をしたが，もとの劣化点数に対して補修量が不足しており，しきい値の超過確率に変化がないことを確認できた。次に劣化順位 11～20 位で，1 年に 1 か所ずつ中規模補修する想定（劣化点数-2500 点）をした結果，例えば 12 位や 16 位の区間では，しきい値の超過確率が小さくなり，補修効果を表現できている。

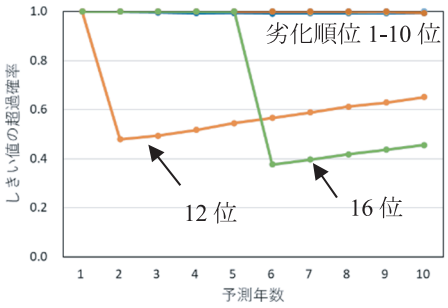

図 6　しきい値の超過確率（補修有り）の一例

かった。

今後の活用方法としては，劣化事象の進展を予測し，将来的に構造物のどの部材が何年でどこまで劣化するのかを把握できる可能性がある。また，種々の補修計画（実施時期，区間，補修量）を仮定することにより，補修の実施に伴う劣化予測を行うことも可能であり，補修工事の順序や平準化などの効率的，効果的な維持管理計画策定の基礎資料として活用できると考えられる。

引き続き，劣化予測結果の活用方法の検討および他形式の構造物への適用を検討していく予定である。

4. 劣化予測と実検査結果の比較

劣化予測による結果の妥当性を実検査結果と劣化予測結果と比較することにより評価した。すなわち，2008～2012 年の 5 回の実検査結果をもとに，2013～2017 年の 5 回について劣化予測を行い，2013～2017 年の実検査結果と比較した。表 4 に統計的指標の一覧，図 7 に 2017 年の確率密度分布を示す。これによると，各年の予測および実測の劣化点数の平均値，標準偏差はほぼ同じ値となった。これは，今回対象とした 2008～2012 年の検査結果において，劣化点数の平均値，標準偏差の時間的変化のうち，2011～2012 年の劣化点数の変化幅が他年度より小さいこと，また単調に増加していることからその履歴を反映した 5 年間の短期間の予測においては，劣化度の成長も小さくなった可能性が考えられた。

5. おわりに

これまでに蓄積されてきた定期検査結果を活用した劣化予測手法について検討を行った。その結果，既往の劣化予測手法により定期検査結果を用いた劣化予測は可能であった。次に 5 年間の短期における予測結果と実点検結果を比較した結果，短期間の予測では実検査結果とほぼ変化がな

表 4　統計的指標一覧

（i）2008～2012 年実検査結果の劣化点数

項目	2008	2009	2010	2011	2012
平均値	580	640	754	803	826
標準偏差	691	811	873	928	946

（ii）2013～2017 年実検査結果および予測結果の劣化点数

項目	2013		2014		2015		2016		2017	
	実測	予測	実測	予測	実測	予測	実測	予測	実測	予測
平均値	846	849	852	860	856	874	861	888	870	904
標準偏差	954	968	965	983	971	1009	973	1032	985	1057

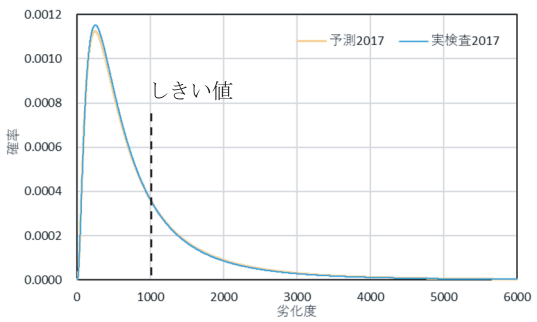

図 7　劣化予測と実検査結果の比較（2017 年）

謝　辞

本研究は，東京都市大学 建築都市デザイン学部 都市工学科　丸山収教授ならびに東急電鉄株式会社との共同研究として実施したものです。また，東急電鉄株式会社ならびに都市開発支店　鉄道土木部　学芸大学総合事務所から蓄積された貴重な検査結果をご提供いただき，数多くの関係者にご協力をいただきました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

1）加藤雄太・畑中達郎・他 9 名：鉄道土木構造物の定期検査結果を活用した劣化予測・維持管理方法に関する検討，令和 5 年度土木学会全国大会第 78 回年次学術講演会，VI-736, 2023

2）丸山収・須藤敦史・他 3 名：トンネル覆工コンクリートの確率的予測モデルの構築，第 7 回構造物の安全性および信頼性に関する国内シンポジウム，pp. 204-209, 2011

STUDY ON A DETERIORATION PREDICTION MODEL USING PERIODICAL INSPECTION RESULTS OF RAILWAY STRUCTURES

T. Hatanaka, R. Satake and K. Hayakawa

Periodic inspections of railway structures are required every two years, and inspection results have been accumulated over many years. However, the accumulated inspection results of the past have not been used effectively. If it becomes possible to predict deterioration using these inspection results, there is a possibility that they can be used to study efficient and effective maintenance and management plans. Therefore, with the aim of making effective use of the accumulated inspection results, a deterioration prediction method was developed and a trial calculation of deterioration prediction using this method was carried out. As a result, it was confirmed that the deterioration prediction model could be used to predict deterioration using inspection results.

In addition, by comparing the prediction results with the actual inspection results, it is possible to use this information as a basis for developing an effective maintenance and management plan.