

## 統計的劣化予測に基づくトンネル補修優先順位の提案

|                   |        |
|-------------------|--------|
| 大阪大学大学院工学研究科 学生会員 | ○安藤 由弥 |
| 大阪大学大学院工学研究科 正会員  | 貝戸 清之  |
| 大阪大学大学院工学研究科 正会員  | 笹井 晃太郎 |
| 国土交通省近畿地方整備局 非会員  | 藤村 知広  |
| 国土交通省近畿地方整備局 非会員  | 井上 謙   |
| 株式会社建設技術研究所 正会員   | 光川 直宏  |
| 株式会社建設技術研究所 正会員   | 井川 理智  |

## 1. はじめに

国土交通省近畿地方整備局（以下、近畿地整）はトンネルを対象として、点検データの健全度に基づいた補修計画を策定している。現状としては、健全度が早期措置段階Ⅲと判定されたトンネルに対して補修が順次行われている。一方で、予防保全段階Ⅱであると判定されたトンネルにおいては、道路トンネル定期点検要領に準じて、主に重点的な監視（定期点検から2年程度以内を目安に近接目視を行うこと）を行っており、予防的な補修着手率は低い割合となっている。仮に健全度Ⅱ判定のトンネルを、Ⅲ判定になる前に補修すれば、順次健全度Ⅲとなるトンネルの減少が期待できる。すなわち、健全度Ⅱ判定トンネルの補修優先順位を明確にすることで、合理的な補修計画を行うことができると考えられる。以上の問題意識のもと、本研究では健全度Ⅱ判定のトンネル群を対象として、管理限界に到達する期待リスクを算出し、比較することで補修優先順位の提案を行う。以下、2. で本研究の基本的な考え方を述べる。3. で部位-変状グループの健全度が低下する確率、および重要度の算出について記述する。4. では、観測下の変状を対象とした劣化シミュレーション、およびフォルト・ツリー分析によるトンネルごとの期待リスクの定量化を行う。5. では、実トンネルにおける適用事例について述べる。

## 2. 本研究の基本的な考え方

平成24年、笹子トンネルで発生した天井板落下事故は記憶に新しい。道路トンネルは覆工がコンクリート構造であり、経年劣化によりコンクリート片が路面に落下することが懸念される。本研究では、トンネル補修優先順位を決める基礎資料としてトンネル点検に

おける部位-変状の組合せを用いている。その結果、第三者被害に繋がる部位-変状の組合せが支配的であることが明らかとなったため、直結するアーチ部、側壁部、横断目地部、水平打継ぎ目部、坑門、内装板の6部位および17変状種別を分析対象とする。

## 3. 劣化速度の評価および部位重要度の算出

トンネルにおいて発生する変状ごとの劣化速度を混合マルコフ劣化ハザードモデルにより評価する。点検による施設の健全度が離散的なⅠ段階で判定される場合、期間 $z$ に健全度が $i$ から $j$ へ推移する確率 $\pi_{ij}(z)$ は

$$\pi_{ij}(z^k|\varepsilon^k) = \sum_{s=i}^j \prod_{m=i}^{s-1} \frac{\lambda_m}{\lambda_m - \lambda_k} \prod_{m=s}^{j-1} \frac{\lambda_m}{\lambda_{m+1} - \lambda_m} \exp(-\lambda_i \varepsilon^k z^k) \quad (1)$$

と表される。 $\lambda_i$ は健全度 $i$ のハザード率、 $k$ は部位-変状グループ、 $l_k$ はグループ $k$ に属する変状、 $\varepsilon^k$ はグループ $k$ の劣化速度の異質性を表すパラメータである。劣化事象が互いに独立であると仮定すれば、劣化推移パターンの同時生起確率密度関数を表す尤度関数は

$$\mathcal{L}(\Xi) = \prod_{i=1}^{I-1} \prod_{j=i}^I \prod_{k=1}^K \prod_{l_k=1}^{L_k} \pi_{ij}(z^{l_k}|\varepsilon^k)^{\delta_{ij}^{l_k}} \quad (2)$$

と表される。MCMC法により未知パラメータを推計し、各グループにおける劣化速度の評価を行う。

トンネルごとの期待リスクを算出する際、トンネル部位の重要度を考慮する必要がある。決定木をはじめとするツリーアルゴリズムでは、分類過程において特徴量がどれだけ寄与しているかを表す特徴量重要度の算出が可能である。本研究では部位の健全度を特徴量とし、トンネル全体の健全度を分類する決定木を考える。これより算出された特徴量重要度は、トンネル部位の重要度であると仮定する。

キーワード トンネル, 混合マルコフ劣化ハザードモデル, 決定木, フォルト・ツリー分析  
連絡先 〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1 工学研究科 AR棟 605号室 TEL 06-6879-7622

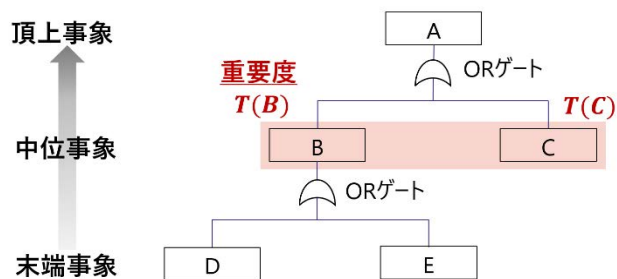


図-1 フォルト・ツリーの基本概念

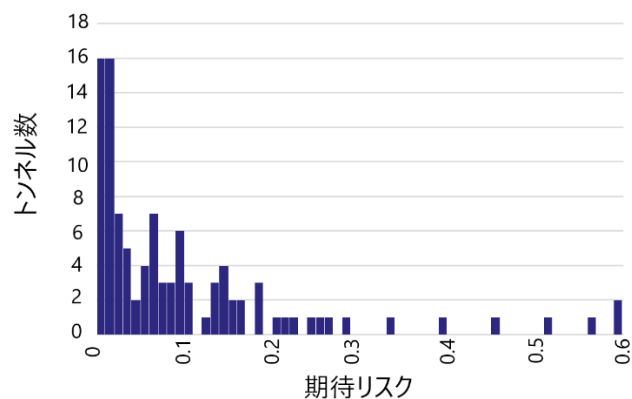


図-2 期待リスクの分布

#### 4. リスク分析

任意の期間 $z$ 後に劣化するか否かを、混合マルコフ劣化ハザードモデルのマルコフ推移確率に基づいた次期健全度シミュレーションにより判定する。いま、時刻 $\tau_A$ で観測された健全度 $h(\tau_A)$ の変状に対し、将来時点 $\tau_B = \tau_A + z$ における健全度を $h(\tau_B)$ とすると、一様乱数 $r \in [0,1]$ を発生させ、

$$\sum_{s=h(\tau_A)}^{\theta_l-1} \pi_{h(\tau_A),s} < r \leq \sum_{s=h(\tau_A)}^{\theta_l} \pi_{h(\tau_A),s} \quad (3)$$

を満たした場合、健全度は $h(\tau_A)$ から $h(\tau_B) = \theta_l$ へ推移したとみなす。シミュレーションは各トンネル10000回実施し、管理限界（Ⅲの変状が少なくとも1つ発生）へ到達する確率を算出する。

本研究で分析対象とするトンネルは複数の部位で構成される構造系であることから、フォルト・ツリー分析が有用であると考えられる。いま、図-1に単純なフォルト・ツリーを想定する。上位事象を $A$ とし、中位事象として $B, C$ 、下位事象として $D, E$ を考える。さらに、各リスク事象が生起する確率をそれぞれ $P(x)$  ( $x = A, B, C, D, E$ )とする。このとき、中位事象 $B$ は、下位事象 $D$ と $E$ に関する「OR 事象(事象 $D$ と $E$ のいずれか一方が生起した場合に生起する事象)」であることからその生起確率は

$$P(B) = P(D \cup E) = P(D) + P(E) - P(D \cap E) \quad (4)$$

と表される。上位事象 $A$ については、中位事象 $B$ と $C$ の重要度を考慮した期待リスク $R(A)$ を考え、

$$R(A) = P(B)T(B) + P(C)T(C) - P(B \cap C)\min\{T(B), T(C)\} \quad (5)$$

と算出する。

#### 5. 適用事例

近畿地整が管理する2時期点検データ総数11,257件を対象として、混合マルコフ劣化ハザードモデルによ

り、部位-変状38グループの劣化速度の異質性を推計し、マルコフ推移確率を算出した。決定木はデータ総数917件(80%訓練データ, 20%テストデータ)を対象とし、分類過程から特徴量重要度を算出した。

本研究により提案した補修優先順位決定モデルを、近畿地整が管理する健全度Ⅱ判定の101トンネルに適用する。劣化シミュレーションは任意の期間 $z = 1$ として実施したため、期待リスクは1年後の値で比較する。期待リスクの分布を図-2に示す。フォルト・ツリー分析では各末端事象の大きさを把握することができるため、リスクの発生経路が明確である。本結果を用いて、期待リスクが上位のトンネルから補修着手し、末端事象の情報に基づいて必要箇所を選定することで、補修計画の合理化が図れる可能性がある。

#### 6. おわりに

本研究では、混合マルコフ劣化ハザードモデル、決定木、劣化シミュレーション、フォルト・ツリー分析により期待リスクを算出し、健全度Ⅱ判定であるトンネルの補修優先順位を提案した。一方で、本研究に関して残された課題が存在する。提案手法によると、劣化シミュレーションにおいて任意期間 $z$ の間に新規発生する変状を考慮できていない。観測された変状の他に、対象構造物内に潜在的な変状が存在すると考えられる。今後、トンネルごとの変状生起を劣化シミュレーションに反映させる必要があるといえる。

#### 【参考文献】

- 1) 貝戸清之, 金治英貞, 小林寛, 間嶋信博, 大石秀雄, 松岡弘大: 目視点検データを用いたフォルト・ツリー分析に基づく長大橋の最適点検政策の決定手法, 土木学会論文集F4, Vol. 67, No. 2, pp.74-91, 2011.