

競合型ハザードモデルによる複合劣化現象のモデル化

株式会社ビーエムシー ○ 杉崎光一*¹
大阪大学大学院 貝戸清之*²
京都大学経営管理大学院 小林潔司*³

By Koichi SUGISAKI, Kiyoyuki KAITO, Kiyoshi KOBAYASHI

アセットマネジメントにおいて、社会基盤施設の劣化予測は極めて重要な技術である。特に、検査データに基づく統計的劣化予測手法は、施設群を対象としたマクロな維持管理戦略を決定するために有用な知見を提供する。実際に近年では、統計的劣化予測手法の実用化に向けた試行が積極的になされている。しかし、従来の統計的劣化予測モデルは単独の因子により劣化が進行する現象のみを扱っており、複合劣化現象を表現することはできない。そこで、本研究では、このような複合劣化現象を競合型ハザードモデルによりモデル化することを試みる。具体的には、コンクリート構造物の鉄筋腐食現象に着目する。鉄筋腐食は、中性化および塩害のそれぞれを単独因子として、あるいはそれらを複合因子として生ずる。従って、はじめに中性化による単独劣化過程をワイブル劣化ハザードモデルで表現し、つぎに塩害の劣化過程に中性化の影響が寄与するようなハザード関数を定義することで、複合劣化現象を競合型ワイブル劣化ハザードモデルで表現する。

【キーワード】劣化予測、複合劣化、競合ハザードモデル、鉄筋腐食、塩害、中性化

1. はじめに

社会基盤施設群を効率的に維持管理するための手法として、アセットマネジメントが着目されている。アセットマネジメントにおいては、管理対象となる施設群がマクロ的にどのような劣化過程を形成するかを予測しておくことが極めて重要な課題であるといえる。そのための劣化予測技術に関しては、点検データに基づいて統計的に予測モデルを構築する統計的手法が提案されている。特に近年ではハザードモデルを利用した劣化予測手法の研究蓄積が著しく、それらの実用性の高さが指摘されている。しかしながら、既往の劣化予測モデルは、単一の因子から生起する劣化現象に主眼が置かれている。社会基盤施設のように構造・材料特性が多様であり、かつ使用・環境条件が逐一異なる状況の下では、最終的な損傷形態が同一であっても、最終損傷に至る因子が複数存在する現象もある。そのなかには、複数の因子がそれぞれ独立で、劣化が個別に進展して最も進

展の早い因子が顕在化する損傷もあれば、複数の因子のうち、いくつかの因子が進展過程で複合して劣化の進展を一層加速させる複合劣化現象もある。本研究は特に後者に着目するものであるが、複合劣化現象の事例としては、コンクリート構造物における鉄筋腐食があげられる。鉄筋腐食は、中性化や塩害に起因すると考えられており、内的塩害の存在下では、中性化の進行により塩害の進行が促進されることが実験結果等を通して確認されている。このように、複数の因子が独立、あるいは複合的に作用することによって引き起こされる劣化現象をモデル化することは、アセットマネジメントの高度化に資する有用な技術であるといえる。

以上の問題意識のもとで、本研究では、複合劣化現象を競合型ハザードモデルによりモデル化することを目的としている。なお、具体的な劣化現象としてはコンクリート構造物の鉄筋腐食を取り上げる。以下、2. で複数因子の競合性を考慮した競合型ワイ

*1 sugisaki@hashimori.jp

*2 工学研究科 フロンティア研究センター 特任講師 kaito@ga.eng.osaka-u.ac.jp

*3 経営管理講座 教授 kkoba@psa.mbox.media.kyoto-u.ac.jp

ブル劣化ハザードモデルを定式化する。3. では中性化と塩害という 2 つの因子が競合する複合劣化現象を取り上げ、実際の検査データを用いて鉄筋開始時期を推定することで、提案モデルの有効性を実証的に検証する。

2. 競合型ワイブル劣化ハザードモデル

(1) 複合劣化現象

中性化および塩害による鉄筋腐食発生メカニズムは、鉄筋位置での塩化物イオン濃度の上昇、もしくは中性化の進行により、不動態被膜が破壊され、それにより鉄筋の腐食が開始するというものである。塩分は不動態被膜を破壊するために作用するが、腐食が発生する化学反応には加担しない。つまり、塩害はあくまで不動態被膜を破壊する引き金に過ぎず、基本的には、その後の鉄筋腐食は酸素量に影響される。複合劣化のメカニズムは、コンクリート内部に初期塩化物イオンが存在する場合、中性化のフロント内部で、化学反応により塩化物イオンが乖離され、塩化物イオンの濃縮が行われることで発生すると考えられている。このため、複合劣化が生じると、鉄筋腐食が発生するまでの潜伏期間は短くなる。潜伏期間への影響を考えると、中性化の進行は特に塩化物イオン濃度とは関係が無く進行する。このため、二つの劣化因子の潜伏期間への影響は、中性化の存在が塩分濃度の濃縮をもたらすという一方的な関係であるといえるが、概して複合劣化は鉄筋腐食が発生するまでの期間に影響していると考えられる。

(2) ハザードモデル

カレンダー時刻とは別に、個々のコンクリート構造物の供用開始時刻を $t=0$ と基準化した時間軸を導入しよう。また、鉄筋腐食が開始するまでの寿命を確率変数 ξ で表し、 ξ が確率密度関数 $f(\xi)$ 、分布関数は $F(\xi)$ に従って分布していると仮定する。ただし ξ の定義域は $[0, \infty]$ である。いま、使用開始から t までに、鉄筋腐食が開始せず、鉄筋が健全な状態で生存する確率を生存確率と呼び、 $\tilde{F}(t)$ で表そう。 $\tilde{F}(t)$ は、鉄筋腐食が開始する累積確率 $F(t)$ を用いると、以下の式で表される。

$$\tilde{F}(t) = 1 - F(t) \quad (1)$$

このとき、鉄筋が時点 t まで健全な状態で生存して、 Δt の間に腐食が開始する確率は、

$$\lambda(t)\Delta t = \frac{f(t)\Delta t}{\tilde{F}(t)} \quad (2)$$

で表され、この確率密度 λ を劣化ハザード関数と呼ぶ。劣化ハザード関数を利用すると、時点 t まで鉄筋が健全な状態で生存する確率は、

$$\tilde{F}(t) = \exp\left(-\int_0^t \lambda(u)du\right) \quad (3)$$

として表される。

(3) 2つの劣化因子が競合するハザードモデル

2(2) で定式化したハザードモデルを利用して、複合劣化現象をモデル化する。コンクリート部材 i ($i=1, 2, \dots, n$) の鉄筋腐食について、劣化因子を中性化と塩害であると考えよう。競合する劣化因子が存在する場合、観測できるのはあくまでもいずれかの劣化因子の中で、最も劣化速度の早い事象だけである。例えば、海岸にあるコンクリート構造物では、塩害が卓越することになるので、塩害による鉄筋腐食の開始時期のみが観測されよう。しかし、その結果には、中性化も何らかの影響を与えている可能性がある。

ここで、ハザード関数に具体的な関数形を与え、劣化モデルを特定化しよう。本研究では、鉄筋腐食の開始時期がワイブル分布に従うものと仮定しよう。これは鉄筋腐食が開始する確率が時間の経過とともに増加することを意味している。あるコンクリート構造物 i において、劣化因子 1 によって劣化が単独に進行している場合を考える。 t_i 時点でのハザード関数は、その他の劣化因子には影響されないため、以下の式で表される。

$$\lambda_{i1}(t_i) = \gamma_1 m_1 t_i^{m_1-1} \quad (4)$$

ここで γ_1 は確率密度関数の尺度を表すパラメータ、 m_1 は時間を通じたハザード率の増加傾向を表す加速度パラメータである。ワイブル劣化ハザード関数を用いた場合、寿命の確率密度関数 $f_{i1}(t_i)$ および生存確率 $\tilde{F}_{i1}(t_i)$ はそれぞれ、

$$f_{i1}(t_i) = \gamma_1 m_1 t_i^{m_1-1} \exp(-\gamma_1 t_i^{m_1}) \quad (5a)$$

$$\tilde{F}_{i1}(t_i) = \exp\left(-\int_0^{t_i} \lambda_{i1}(u)du\right) = \exp(-\gamma_1 t_i^{m_1}) \quad (5b)$$

で表される。

次に、劣化因子 2 により劣化が進行している場合の観測点 t_i でのハザード関数を定義しよう。この際には、劣化因子 1 との複合劣化現象が生じる場合があると考え、その際には、劣化因子 1 との競合性を表現しなくてはならない。本モデルでは、劣化因子 2 によるハザード関数において、複合劣化が観測された場合は、その影響は劣化因子 2 のパラメータ γ_2 に対して、劣化因子 1 によるハザード関数が線形的に影響すると考える。ただし、ハザード関数は時間 t_i の関数であることに注意されたい。

$$\lambda_{i2}(t_i) = \{\gamma_2 + \alpha\delta_i\lambda_{i1}(t_i)\}m_2t_i^{m_2-1} \quad (6)$$

ここで、 δ_i は複合劣化が発生している場合に 1、それ以外は 0 となるダミー変数である。また、 α は劣化因子 1 が劣化因子 2 のハザード関数にどの程度影響するかを表すパラメータである。これにより、複合劣化が発生している場合、劣化因子 1 のハザード関数が、劣化因子 2 のハザード関数へ与える影響をモデル化することができる。式(5a)と(5b)より、競合型ワイブル劣化ハザードモデルにおける寿命の確率密度関数 $f_{i2}(t_i)$ および生存確率 $\tilde{F}_{i2}(t_i)$ はそれぞれ、

$$f_{i2}(t_i) = \lambda_{i2}(t_i) \exp\left(-\int_0^{t_i} \lambda_{i2}(u) du\right) = \{\gamma_2 + \alpha_1\delta\gamma_1m_1t_i^{m_1-1}\}m_2t_i^{m_2-1} \cdot \quad (7)$$

$$\exp\left[-\gamma_2t_i^{m_2} - \alpha_1\delta\gamma_1m_1m_2\frac{t_i^{m_1+m_2-1}}{m_1+m_2-1}\right] \\ \tilde{F}_{i2}(t_i) = \exp\left(-\int_0^{t_i} \lambda_{i2}(u) du\right) = \exp\left[-m_2\int_0^{t_i} \{\gamma_2 + \alpha_1\delta\gamma_1m_1u^{m_1-1}\}u^{m_2-1} du\right] \\ = \exp\left[-m_2\int_0^{t_i} \{\gamma_2 + \alpha_1\delta\gamma_1m_1u^{m_1-1}\}u^{m_2-1} du\right] \\ = \exp\left[-\gamma_2t_i^{m_2} - \alpha_1\delta\gamma_1m_1m_2\frac{t_i^{m_1+m_2-1}}{m_1+m_2-1}\right] \quad (8)$$

となる。

(4) モデルの推計方法

前節で定式化した競合型ワイブル劣化ハザードモデルについて、モデルの推計方法を以下述べる。いま、検査データからは、検査時点でサンプルごとに劣化が起こっているか否か、またその原因はなにか（中性化、塩害、複合劣化）、さらに供用開始からの経年に関する情報を得る必要がある。検査時点 t

において以下のダミー変数を定義しよう。

$d_{i1}=1$: 中性化によって劣化が発生している場合

$d_{i2}=1$: 塩害によって劣化が発生している場合

また、各鉄筋の腐食開始時期は、個々のコンクリート構造物の材料・環境特性によって影響されると仮定する。そのため、それぞれの劣化因子において、 (K_1, K_2) 個の環境特性を表すベクトル (x_1^k, x_2^k) を導入する。ここで、環境特性はパラメータ γ に対数線形的に影響すると考えると、

$$\gamma_q = \exp(x_{iq}\beta'_q) \quad q=1,2 \quad (9)$$

となる。ここで β は、

$$\beta_q = (\beta_q^1, \beta_q^2, \dots, \beta_q^K) \quad (10)$$

なる未知パラメータである。

つぎに、尤度関数を定式化すると、以下の式で定式化される。

$$L(x_{iq}; \theta_q) = \prod_{i=1}^N \prod_{q=1}^2 f_{iq}(t_i)^{d_{iq}} \tilde{F}_{iq}(t_i)^{1-d_{iq}} \quad (11)$$

ここで、 $\theta_q = (\beta_q, m_q, \alpha)$ である。したがって、対数尤度関数は、

$$\ln L(x_{iq}; \theta_q) = \sum_{i=1}^N \sum_{q=1}^2 d_{iq} \ln f_{iq}(t_i) \cdot (1-d_{iq}) \ln \tilde{F}_{iq}(t_i) \quad (12)$$

となる。対数尤度関数(12)を最大にするようなパラメータ θ の最尤推定量は、

$$\frac{\partial \ln L(x_{iq}; \theta_q)}{\partial \theta_q} = 0 \quad (q=1,2) \quad (13)$$

を満足するような、 $\hat{\theta} = (\hat{\theta}_1, \hat{\theta}_2)$ として与えられる。

3. 適用事例

(1) 点検データの概要

コンクリート構造物では、特に高欄やスラブにおいて第三者被害などが発生する可能性があり、「発生が懸念される箇所等の整理」「危険度の確率化」「原因の推定」等を行う上で、劣化予測は重要である。近年では、簡易にかぶり、中性化深さ、塩化物イオン濃度を計測できる機器が開発されており、鉄筋腐食の発生を実構造物において定量的に評価する方法が確立されつつある。本研究では、より詳細な調査を行ったデータ、特にコアとして採取された試料について評価したデータを利用する。

表-1 使用したデータの概要（総サンプル数：145）

項目	平均	標準偏差
経年	46.2	19.4
中性化深さ (mm)	38.3	9.0
鉄筋位置での塩化物イオン濃度 (kg/m ³)	1.1	1.4

表-2 鉄筋腐食発生 の推定基準

項目	利用したデータ	基準値
中性化	中性化残り	10mm
塩害	塩化物イオン濃度 (全塩分量)	1.2kg/m ³
複合劣化	塩化物イオン濃度 の表面からの分布	-

本分析で利用した全 145 サンプルの経年、中性化深さ、鉄筋位置での塩化物イオン濃度の平均と分散を表-1 に示す。本サンプルは海岸線に近い構造物を対象としているため、塩化物イオン濃度が全体的に高いことが見て取れる。また、経年については比較的ばらつきが大きいことが特徴である。

本モデルの被説明変数として必要なものは、あくまでもある経年において鉄筋腐食が発生しているか否かの二値である。この際には、中性化によって発生したのか、塩害によって発生したのか、または、複合劣化によって発生したのかの原因を特定する必要がある。この際には、目視検査によって発生の有無を確認するのが一番正確ではあるが、コンクリート構造物の場合、鉄筋の腐食はひび割れが発生していない限り外観からは確認できない。このために、鉄筋腐食の発生を推定するために、表-2 に示した物理量と、実験的に得られた基準値（閾値）を利用した。特に、複合劣化の発生については、既往の研究を参考に、表面からの塩化物イオン濃度の分布形状によって判断した³⁾。確率分布を規定する材料・環境特性としては、塩害については海岸からの距離や表面塩化物イオン量を利用した。ただし、中性化については利用できるデータが無く、構造物が設計どおり施工されていると考え、特に材料・環境特性は考慮しなかった。

(2) 競合型ハザードモデルの推計

2. で定式化したハザードモデルを利用して、実際のデータを利用して実証分析を行った。劣化因子 2 によるハザード関数は、海岸からの距離や表面塩化物イオン濃度から推計したが、この両者に特に相関が高くないことを述べておく。なお、推計結果から、中性化と塩害が単独で生起する劣化現象と、これらの複合劣化現象に関して、期待劣化パスを算出することができる。さらに、本研究では、これらの期待劣化パス、さらには物理的な劣化予測モデル⁴⁾との比較検討を行った。これらの解析結果については、本論文では紙面の都合上割愛するが、発表会当日に提示させて頂きたい。

4. まとめ

本研究では、社会基盤施設の複合劣化現象を対象として、複数の因子の競合性を考慮した競合型劣化ハザードモデルを提案した。具体的には、コンクリート構造物の鉄筋腐食開始時期の推定問題に着目して、中性化と塩害の複合劣化現象が鉄筋開始時期に及ぼす影響について分析を行った。

なお、本研究の一部（貝戸清之担当分）は文部科学省科学技術調整振興費「若手研究者の自立的研究環境整備促進」事業によって大阪大学大学院工学研究科グローバル若手研究者フロンティア研究拠点において実施された。ここに記して感謝の意を表する。

【参考文献】

- 1) 青木一也，山本浩司，小林潔司：劣化予測のためのハザードモデルの推計，土木学会論文集，No.791/VI-67，pp.111-124，2005。
- 2) 佐伯竜彦，植木聡，嶋毅：塩害と中性化の複合による塩化物イオンの浸透予測モデルの構築：土木学会論文集，No.697/V-54，pp.131-142，2002。
- 3) 川村力：実構造物の調査に基づいた鉄道コンクリート橋りょうの耐久性照査法に関する研究，北海道大学博士論文，2006。
- 4) 土木学会：2001 年制定コンクリート標準示方書〔維持管理編〕，2001