

マルコフ連鎖モデルに基づく外装材の劣化シミュレーション

その7. 外装材のひび割れに基づいた標準耐用年数および劣化係数の推定

正会員 ○越中谷光太郎\*1 同 今本 啓一\*1  
同 本橋 健司\*2 同 兼松 学\*1  
同 榆木 堯\*3 同 清原 千鶴\*1

仕上塗材 目視調査 マルコフ連鎖  
劣化シミュレーション 耐用年数予測手法

1. 研究目的

近年、新築のみならず既存ストックを含めた建築物の長寿命化や省エネルギー化の需要が高まっており、それらの評価に必要な耐用年数予測についても規格整備に向けた研究が行われている。しかしながら、外装仕上材の劣化には施工、環境、材料特性その他複合的な因子が含まれているため、因子毎の劣化メカニズムを積み上げて全体を予測することは容易ではない。そこで本研究では、実建造物の調査結果に基づき、確率論モデルであるマルコフ連鎖モデルを用いた劣化シミュレーションに基づく建築材料の標準耐用年数および劣化係数の予測手法の確立を試みる。

2. 調査対象および調査方法

表1に示す調査対象である団地の4棟について2012~2016年度に外装仕上材のひび割れおよび躯体コンクリートの中酸化調査を行った。調査方法は以下のとおりである。

①ひび割れ：目視で簡便に評価できる劣化事象であるため、ひび割れ状態を4段階のグレードに分類し(表2)、建物の劣化グレード分布を調査する。

②中酸化：中酸化深さは、調査箇所においてコアの採取を行い、フェノールフタレイン液を噴霧し、着色後ノギスで測定した。

表1 調査対象

調査対象	築年度	改修年度	改修からの経年数	外装仕上材	塗膜材色
A号棟	昭和53年	平成22年	6年	樹脂系 仕上塗材	白
B号棟	昭和54年	平成20年	8年		
C号棟	昭和54年	平成13年	15年		
D号棟	昭和54年	平成9年	19年		

表2 劣化グレード判定基準(ひび割れ)

グレード	劣化状況
グレード0	ひび割れが全くない
グレードI	1~数本程度のひび割れ
グレードII	10本程度のひび割れ
グレードIII	一様なひび割れ

3. 調査結果

図1は調査対象の南北東西面および雨掛りの有無による改修からの経年数と平均ひび割れグレードを表したものである。全体の傾向としては改修からの経年数の増加による劣化の進行が確認された。また、方位については南面が、雨掛りについては雨掛り有り部のひび割れが比較的に行進していることがわかる。

図2は調査対象の南北面および雨掛りの有無による改修からの経年数と中酸化深さ測定の結果を表したものである。改修からの経年数が大きくなるほど中酸化の進行が遅れていることがわかる。これは、各調査対象の築年数がほぼ同等であり、かつ、塗り替え回数が1回であることから、改修から調査時までの経年だけでなく、新築から改修までの経年も中酸化の進行に大きな影響を与えているためだと考えられる。また、方位については南面、雨掛りについては雨掛り無し部において、中酸化が進行していることがわかる。南面については紫外線等により外装材が劣化し中酸化抑制効果が減少したことが原因であると考えられ、雨掛り無し部については下地コンクリートの表層部が乾燥し、二酸化炭素の侵入量が増加したことが原因であると予想される。

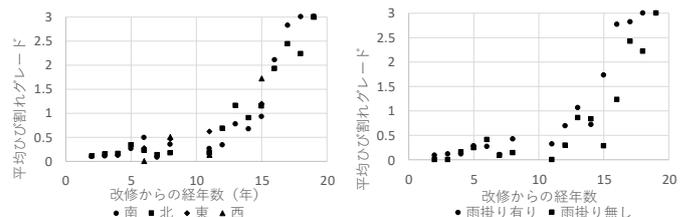


図1 ひび割れグレード(左図：方位、右図：雨掛り)

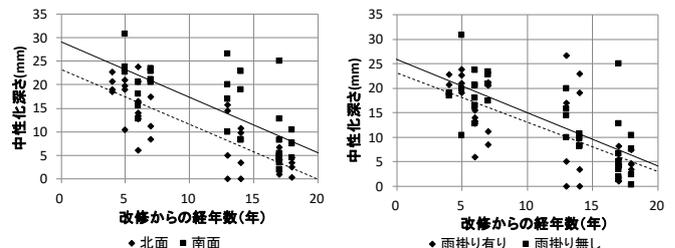


図2 中酸化進行(左図：方位、右図：雨掛り)

Degradation simulation of external finishing based on ECCHUYA Kotaro, IMAMOTO Keiichi, MOTOHASHI Kenji, Markov Chain Model - Part7. Estimation of Standard service life and deterioration factors on crack of external finishing. KANEMATSU Manabu, NIREKI Takashi, KIYOHARA Chizuru

#### 4. マルコフ連鎖モデルによる劣化予測シミュレーション

##### 4.1 マルコフ連鎖を用いた劣化進行モデル

マルコフ連鎖モデルにおいては、単位時間内のある劣化度は図3のようにある遷移確率  $x$  で次の劣化度に移行し、移行しない残り  $(1-x)$  は同じ劣化度に留まると仮定される。 $t$  を使用年数(築年数, 経年数),  $0 \sim \text{III}$  を  $t$  年後の劣化度分布,  $x_0, x_1, x_2$  をそれぞれの遷移確率とすると, 劣化進行は図4の行列式で表される。ここで遷移確率を設定することで確率モデルによる劣化予測が可能となる。

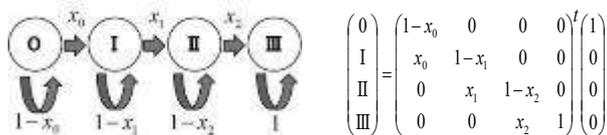


図3 劣化進行概念 図4 劣化進行行列式

$$\begin{pmatrix} 0 \\ \text{I} \\ \text{II} \\ \text{III} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1-x_0 & 0 & 0 & 0 \\ x_0 & 1-x_1 & 0 & 0 \\ 0 & x_1 & 1-x_2 & 0 \\ 0 & 0 & x_2 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

##### 4.2 遷移確率の算出およびシミュレーション結果

ひび割れグレードII+IIIのシミュレーション結果を図5に示す。「建築物の耐久計画に関する考え方」<sup>1)</sup>の鉄筋コンクリート造外装の耐用年数の推定方法では「塗膜が劣化し、通常の修繕では回復することができない状態」を耐用年数と定めているが、その状態を「ひび割れ劣化度II+IIIが60%以上になった状態」と仮定すると、各方位および雨掛り有無毎の耐用年数はひび割れのマルコフ連鎖モデルによるシミュレーション結果により推定することができる。また、調査対象全体のシミュレーション結果における耐用年数を「標準耐用年数」とすると、各方位および雨掛り有無による耐用年数と比較することにより劣化係数を定めることができる。その結果を表3に示す。

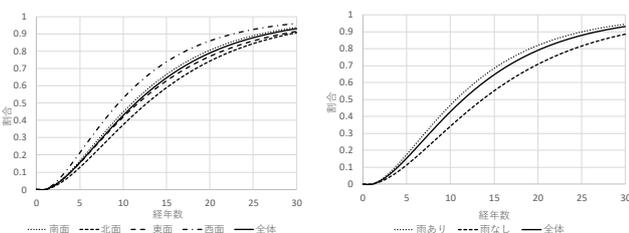


図5 シミュレーション結果(劣化度II+III)

表3 方位・部位毎の耐用年数および劣化係数

	南	北	東	西	全体
耐用年数	13.3	15.3	14.2	11.5	13.8
方位係数	0.96	1.11	1.03	0.83	1.00

	雨掛り有り	雨掛り無し	全体
耐用年数	12.8	16.4	13.8
部位係数	0.93	1.19	1.00

#### 5. 中性化抑制効果に基づいた標準耐用年数の推定

##### 5.1 累積超過劣化度

筆者らは以前当該調査対象に対し、塗膜の健全な状態は中性化がほとんど進行しない状態であり、中性化が顕

著に進行し始める経年数を耐用年数と仮定し、耐用年数超過年数と各経年における劣化の限界超過度合を考慮した累積超過劣化度を設定し、中性化深さとの関係の考察を行った<sup>2)</sup>。累積超過劣化度の定義を式(1)に示す。

$$D_a = \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^{T(n)-L} (d_n(L+t) - d_n(L)) \quad (1)$$

ここで、 $D_a$  は累積超過劣化度、 $N$  は外装仕上材料の新築時を含む塗装回数(回)、 $T(n)$  は  $n$  回目の塗装における塗装時から改修時 ( $n=N$  の場合は塗装時から調査時) までの経年数(年)、 $L$  は外装仕上材料の耐用年数(年)、 $d_n(x)$  は  $n$  回目の塗装の経年数  $x$  時のマルコフシミュレーションの劣化グレードIIIの割合 ( $0 < d_n(x) < 1$ ) を表し、経年数が耐用年数を超える場合 ( $x > L$ ) のみ考慮する。

##### 5.2 中性化深さと累積超過劣化度の関係

調査対象全体のひび割れシミュレーション結果に基づいた累積超過劣化度  $D_a$  が0の時に中性化深さが0mmとなる耐用年数  $L$  (下地コンクリートの中性化を最小限に抑える外装材の改修時期) を標準耐用年数と仮定すると、標準耐用年数は9.1年となり、 $D_a$  と中性化深さの関係は図6のようになる。また、同様に各方位および雨掛りの有無毎の累積超過劣化度  $D_a$  から耐用年数を算出し、標準耐用年数(9.1年)と比較すると劣化係数は表4のように定まる。これは表3で定めた外装材の改修に観点を置いた劣化係数とは異なり、外装材の中性化抑制効果に対する劣化係数を表していると言える。

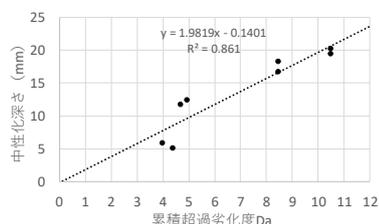


図6 累積超過劣化度  $D_a$  と中性化深さの関係

表4 方位・部位毎の耐用年数および劣化係数

	南	北	雨あり	雨なし	全体
耐用年数	7.7	12.0	10.8	5.8	9.1
劣化係数	0.85	1.32	1.18	0.64	1.00

#### 5. まとめ

ひび割れの劣化分布に基づくマルコフ連鎖モデルを用いた劣化予測シミュレーションによる外装仕上材の劣化進行予測をおこなうことにより、外装材の中性化抑制効果に観点を置いた標準耐用年数および劣化係数の推定をおこなった。今後、調査データを増やすことにより更に精度の高い標準耐用年数と劣化係数の推定が期待できる。

##### 参考文献

- 1) 日本建築学会, 建築物の耐久計画に関する考え方, 丸善株式会社, 1998.10
- 2) 越中谷光太郎他, マルコフ連鎖モデルによる外装仕上材の劣化予測と中性化抑制効果の評価方法に関する研究, コンクリート工学年次論文集, p.729-734, 2016

\*1 東京理科大学大学

\*2 芝浦工業大学

\*3 (一財)ベターリビングつくば建築試験研究センター

\*1 Tokyo University of Science

\*2 Shibaura Inst. of Tech,

\*3 Tsukuba Building Test Laboratory, Center for Better Living