

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5. 改修後2~17年のRC外壁を対象とした実地調査

正会員 ○越中谷光太郎*1 同 今本 啓一*2
同 本橋 健司*3 同 兼松 学*4
同 榆木 堯*5 同 鹿毛 忠継*6
同 古賀 純子*7 同 清原 千鶴*8

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

我が国では「持続可能な社会の発展」が求められており、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いる。また、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、実構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耐用年数予測手法の確立を試みる。本報その5では、2014年度までに実施した実地調査結果の報告である。

2. 調査対象および調査方法

調査対象である団地の4棟について2012~2014年度に調査を行った(表1)。調査方法は以下のとおりである。

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54年	平成9年	17年	マスチック	白
B号棟	昭和54年	平成13年	13年		
C号棟	昭和54年	平成20年	6年		
D号棟	昭和53年	平成22年	4年		

①光沢度: 仕上塗材の凹凸の凸部分の光沢度を、光沢度計を用いて測定する。その建築物の2012年度調査時の最も劣化の小さいと思われる測定点をイニシャルとし、その他の測定点と比較して光沢度保持率を算出する。

②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、建物の劣化グレード分布を調査する。

③中性化: 中性化深さは、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。

3. 調査結果

図1は2014年度調査時の各建築物の南面雨掛かり有りおよび北面雨掛かり有りに関する光沢度保持率を表し

たものである。

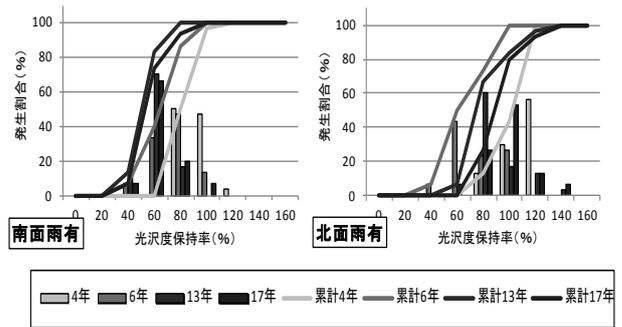


図1 各棟の光沢度保持率比較

図2は2014年度調査時の各建築物の南面雨掛かり有りおよび北面雨掛かり有りのひび割れの劣化度分布を示す。

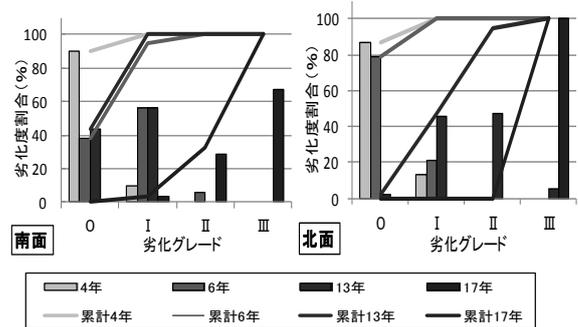


図2 各棟のひび割れ比較

図3に各建築物の南北面の中性化深さ測定の結果を示す。

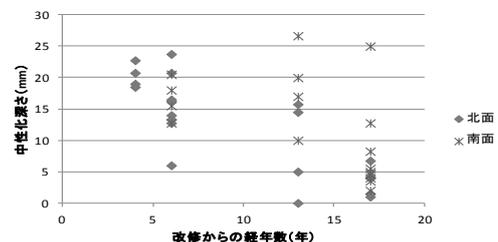


図3 中性化深さ測定

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4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。これがすべての劣化度で同時に起こり、最終的には劣化度Ⅲ（最終劣化グレード）に収束する。t を使用年数（築年数、経年数）、0～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 5 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。

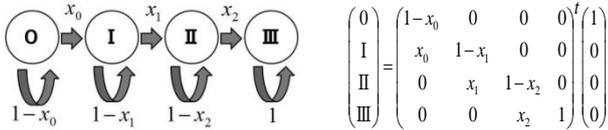


図 4 劣化進行概念 図 5 劣化進行行列式

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

4.2 遷移確率の算出およびシミュレーション結果

シミュレーション結果を図 6 に示す。経年数ごとの結果にばらつきがあったため、シミュレーションについては各遷移確率の平均値を用いた。

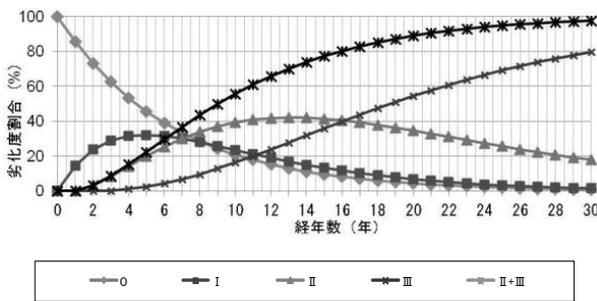


図 6 シミュレーション結果（ひび割れ・南面）

4.3 既往の研究を用いた耐用年数の推定

松田らにより¹⁾、外壁仕上材料の寿命は、仕上材料の中性化速度係数が打ち放しコンクリートと同等になる時期であると提案され、調査した実構造物の外装仕上材（複層塗材）の寿命をおおよそ 13 年と予測している。本研究で調査した外装仕上材料の耐用年数を同様に 13 年と仮定した場合にシミュレーション結果により相当する劣化グレードⅡ+Ⅲの割合は約 60%と評価される。

4.4 中性化深さと寿命超過年数の関係

本調査で測定した中性化深さの平均、および、新築・改修からの経年数の関係を表 2 に示す。

C 号棟および D 号棟については外装仕上材の寿命（13 年）を超過した年数の合計が大きいほど中性化が進んでいるのが確認できるが、A 号棟および B 号棟については超過年数の合計が同じであるにも関わらず中性化深さに相違が見られる。これは、外装仕上材の寿命を超過するほど劣化度合が大きくなり中性化抑制効果が減少するた

めであると考えられ、単純な寿命超過年数の合計と中性化深さを比較することができないことを表している。

表 2 中性化深さおよび塗装からの経年数

調査対象	中性化深さの平均	築年度から改修までの年数	改修から現在までの年数	13 年を超過した年数の合計
A 号棟	6.2mm	18 年	17 年	9 年
B 号棟	13.6mm	22 年	13 年	9 年
C 号棟	15.8mm	29 年	6 年	16 年
D 号棟	20.3mm	31 年	4 年	18 年

そこで、寿命時の劣化状態を健全な状態の限界であると仮定し、寿命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 D を以下の式のように設定し、中性化深さとの関係を考察する。

$$D = \sum_{t=1}^{T-L} (d_{L+t} - d_L)$$

ここで、D は累積超過劣化度、T は新築・改修からの経年、L は仕上げ材の寿命、 dx は経年数 x の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 ($0 < dx < 1$) を表し、経年数が寿命を超える場合 ($t > L$) のみ考慮する。

寿命を 13 年と仮定した各建築物の累積超過劣化度 D の計算結果と中性化深さの平均との関係を表 3 に示す。

表 3 累積超過劣化度と中性化深さの関係

調査対象	累積超過劣化度	中性化深さの平均
A 号棟	0.72	6.2 mm
B 号棟	1.31	13.6 mm
C 号棟	3.87	15.8 mm
D 号棟	4.81	20.3 mm

累積超過劣化度 D が増加するほど、その建築物の中性化深さの平均が増加することが確認できる。この結果は、築年数と改修回数が同一であったとしても、改修時期を寿命から遅らせるほど仕上げ材が劣化し中性化が促進されることを表しており、適切な改修計画の立案・実施が中性化の抑制＝建築物の長寿命化に重要であることを示していると推測される。

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料の劣化度割合から求められる累積超過劣化度と中性化深さの関係について検討し、外装仕上材の寿命を考慮した適切な改修計画の立案・実施が重要であることを示した。

参考文献

- 1) 松田 啓 マルコフ連鎖モデルと現位置非破壊試験を組み合わせた外壁仕上げ材料の経年劣化と躯体の保護効果の評価に向けた基礎的研究 2012 年度東京理科大学修士論文

*1 東京理科大学大学院工学部研究科建築学専攻 修士
 *2 東京理科大学工学部建築学科 教授
 *3 芝浦工業大学工学部建築工学科 教授
 *4 東京理科大学理工学部建築学科 准教授
 *5 (一財)ベターリビングつくば建築試験研究センター
 *6 国土交通省国土技術政策総合研究所 博士 (学術)
 *7 国土交通省国土技術政策総合研究所 博士 (工学)
 *8 東京理科大学工学部建築学科 補手

*1 Dept. of Arch., Graduate School of Tech., Tokyo University of Science
 *2 Prof., Dept. of Arch, Fac. of Tech., Tokyo Univ. of Science, Dr. Eng
 *3 Dept. of Arch. and Building Engineering, the College of Eng., Shibaura Inst. of Tech, Dr. Eng and Dr. Agr.
 *4 Assoc. Prof., Dept. of Arch, Fac. of Sci. and Tech., Tokyo Univ. of Science, Dr. Eng
 *5 Tsukuba Building Test Laboratory, Center for Better Living
 *6 National Institute for Land and Infrastructure Management
 *7 National Institute for Land and Infrastructure Management
 *8 Assistant, Dept. of Arch, Fac. of Tech., Tokyo Univ. of Science, Dr. Eng