

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6. 改修後2~18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 楡木 堯*5 同 清原 千鶴*6

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、2015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2012~2015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53年	平成22年	5年	樹脂系 仕上塗材	白
B号棟	昭和54年	平成20年	7年		
C号棟	昭和54年	平成13年	14年		
D号棟	昭和54年	平成9年	18年		

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。

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

②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2015年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ついてのひび割れを表したものである。

である。全体の傾向としては南面、北面共に経年の増加による劣化の進行が確認された。

図2はA号棟およびC号棟の2012~2015年のひび割れの推移を表したものである。全体の傾向としては経年の増加によってひび割れの進行が確認された。

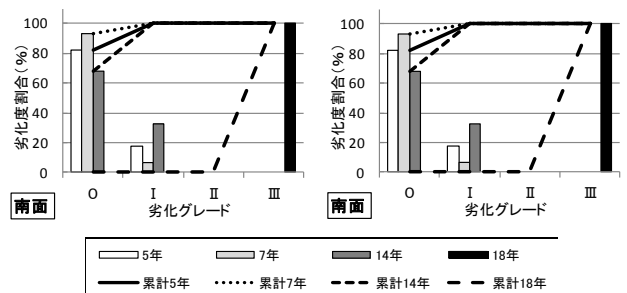


図1 方位毎のひび割れ比較

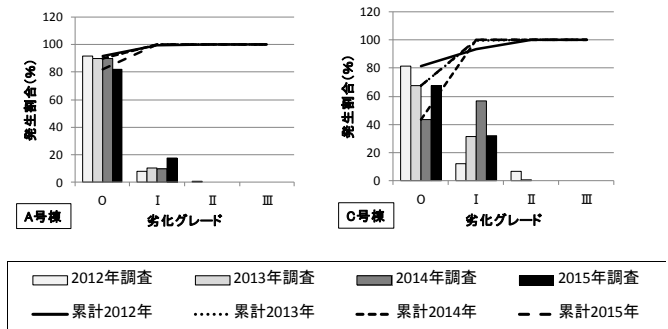


図2 各棟のひび割れ比較

表3に各建築物の南北面の中性化深さ測定の結果を示す。改修からの経年数が大きくなるほど中性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、改修からの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性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。

表3 中性化深さおよび塗装からの経年数

調査対象	築年度から改修までの年数	改修から現在までの年数	中性化深さの平均
A号棟	31年	5年	21.1mm
B号棟	29年	7年	18.3mm
C号棟	22年	14年	10.3mm
D号棟	18年	18年	5.1mm

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。

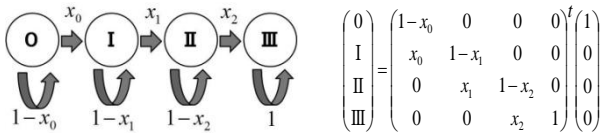


図4 劣化進行概念 図5 劣化進行行列式

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5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。

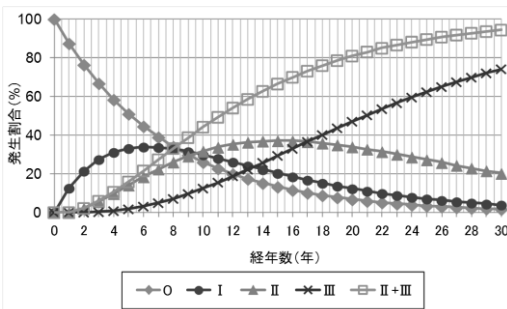


図6 シミュレーション結果（ひび割れ・南面）

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 中性化深さと累積超過劣化度の関係

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割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。本報についても累積超過劣化度を用いて、仕上げ塗材自体の中性化抑制効果について考察する。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。

4.4 中性化深さと累積超過劣化度の関係

耐用年数をそれぞれ8年、13年と仮定した各建築物の累積超過劣化度と中性化深さの平均との関係を図7に示す。累積超過劣化度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。また、耐用年数を8年と仮定した場合には累積超過劣化度が0の時に中性化深さの平均が0となり、累積超過劣化度の定義に矛盾しない。そのため、今回調査した外装仕上材料に関しては、8年以内に累積超過劣化度が発生しない範囲で塗替えをすることによって、仕上げを最も長く使用でき且つ下地コンクリートの中性化を最大限に抑えることができ、この意味で耐用年数の一つの考え方として8年を挙げる可以考虑。

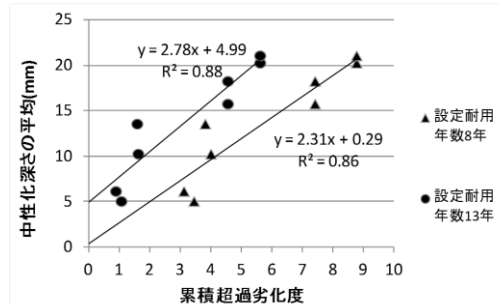


図7 累積超過劣化度と中性化深さの関係

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、中性化深さ及び耐用年数の関係について検討した。より多くのデータを蓄積し、累積超過劣化度と中性化深さの相関性が明らかになれば、外装仕上材料の経年劣化を加味した中性化予測が可能になると期待できる。

参考文献

- 1) 松田 啓 松田 啓 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材料の経年劣化と躯体保護効果の評価に向けた基礎的研究, 日本建築学会構造系論文集 78(683), 27-33, 2013

*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 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 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 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 Assistant, Dept. of Arch, Fac. of Tech., Tokyo Univ. of Science, Dr. Eng