

# 論文 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

越中谷 光太郎<sup>\*1</sup>・今本 啓一<sup>\*2</sup>・本橋 健司<sup>\*3</sup>・清原 千鶴<sup>\*4</sup>

**要旨：**実建造物の調査結果に基づき、確率論モデルを用いて外装仕上材料の耐用年数予測手法の可能性について提案した。実建造物の外装仕上材料に対し、ひび割れ等の調査を行った。マルコフ連鎖モデルの劣化シミュレーション結果を用い、外装仕上材料の経年と劣化の累積である累積超過劣化度の式を設定した。累積超過劣化度と中性化深さとの相関性の確認をおこなった。累積超過劣化度と外装仕上材料の耐用年数との関係について考察をおこなった結果、外装仕上材料の経年劣化を加味した中性化予測の可能性を示した。

**キーワード：**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. はじめに

我が国では、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。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いた確率論モデルの一つ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よる外装仕上材料の耐用年数予測手法の可能性について提案する。

## 2. 調査対象および調査方法

### 2.1 調査対象

調査対象である鉄筋コンクリート造の団地の4棟について2012年度から2015年度の調査を行った(表-1)。なお、「改修からの経年数」は2015年調査時の経年数を示している。また、4棟は近隣に位置するため、環境条件についてはほぼ同様であると考えられる。外装仕上材料の改修回数はいずれも1回であるが、改修の年度がそれぞれ異なる。

### 2.2 調査方法

以下に本研究で行った調査項目を示す。

- ①光沢度：光沢度計を用い、各方位の雨掛かりの有部および無部に対し、それぞれ20~40点程度測定する。その建築物の2012年度調査時の最も劣化の小さい測定面における各測定点の光沢度の平均をイニシャルとし、その他の測定点と比較して光沢度保持率を算出する。
- ②変退色：塗膜の色相、明度、彩度を、色差計を用い、各方位の雨掛かりの有部および無部に対し、それぞれ20~40点程度測定する。その建築物の2012年度調査時の

最も劣化の小さい測定面における各測定点の色相、明度、彩度それぞれの平均をイニシャルとし、その他の測定点と比較することで変退色の度合いを算出する。

③白亜化：JIS K 5600-8-6「塗料一般試験方法 第8部 塗膜劣化の評価 第6節 白亜化の等級」に基づき、各方位の雨掛かりの有部および無部に対し、それぞれ10~20点程度調査し、劣化グレードの分類を行なう。

④ひび割れ：目視により、各方位の雨掛かりの有部および無部に対し、それぞれ100~200点程度の調査箇所(5cm×5cm)のひび割れ状態を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。グレード判定基準を表-2に示す。

⑤中性化：中性化深さは、南北面の雨掛かりの有部および無部に対し、それぞれ4点程度の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			
	A号棟	B号棟	C号棟	D号棟
構法	鉄筋コンクリート造			
階高	4階建	4階建	4階建	12階建
設計基準強度	180 N/mm <sup>2</sup>	180 N/mm <sup>2</sup>	210 N/mm <sup>2</sup>	210 N/mm <sup>2</sup>
築年度	昭和53年	昭和54年	昭和54年	昭和54年
改修年度	平成22年	平成20年	平成13年	平成9年
改修からの経年数	5年	7年	14年	18年
仕上材	樹脂系外装仕上塗材			
塗膜材色	白			

表-2 ひび割れグレード判定基準

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

\*1 東京理科大学大学院 工学研究科建築学専攻 (正会員)

\*2 東京理科大学 工学部建築学科教授 工博 (正会員)

\*3 芝浦工業大学 工学部建築工学科教授 工博 (正会員)

\*4 東京理科大学 工学部建築学科嘱託補手 工博 (正会員)

### 3.調査結果および考察

#### 3.1 光沢度保持率

図-1 および図-2 に 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光沢度保持率を示す。経年数 5 年から 14 年にかけては経年による劣化が観測できるが、それ以降経年数 18 年までの変化は小さい。

図-3 に A 号棟の 2012 から 2015 年の光沢度保持率の推移を示す。経年数が増えるほど光沢度保持率の低下(劣化)が進んでいることがわかる。この傾向は B 号棟でも見られた。

次に C 号棟の 2012 から 2015 年の光沢度保持率の推移を図-4 に示す。経年が増えても劣化の進行が停滞しており、この傾向は D 号棟でも見られた。これは、光沢度保持率の低下は早い段階(調査結果では経年 2 年程度)から進行するが、ある段階(調査結果では経年 11 年程度)で低下の進行が緩やかになるためと考えられる。

#### 3.2 色差

図-5 および図-6 に 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変退色を示す。経年 5 年から 14 年までは経年の進行にしたがって変退色が進行していることがわかる。しかし、経年 18

年については変退色の進行が経年 14 年に比べて後退している。これは、外壁の塗膜材色が白色であるため、白亜化の進行により変退色が逆行しているためと考えられたが、白亜化調査の結果(表-3)を見ると、経年 18 年の白亜化が他の経年に比べて大きく進行しているわけではないことがわかる。

#### 3.3 白亜化

表-3 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白亜化を表したものである。経年数 5 年から 14 年にかけては白亜化の進行が進んでいることがわかるが、経年数 18 年に関しては白亜化の進行が後退している。D 号棟(経年数 18 年)に関しては光沢度保持率および変退色でも同様の傾向が確認されており、D 号棟のみ他の棟とは大きく異なる塗材が使用さ

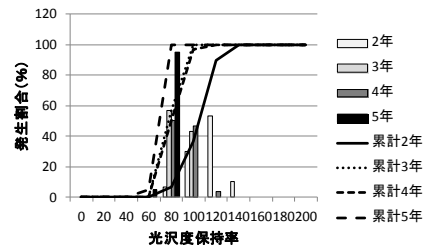


図-3 A号棟の光沢度保持率推移

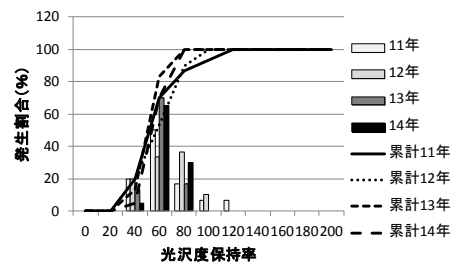


図-4 C号棟の光沢度保持率推移

表-3 白亜化調査結果

調査対象	経年数	白亜化グレードの平均			
		雨掛かり有		雨掛かり無	
		南	北	南	北
A号棟	5	1.00	1.00	1.00	1.00
B号棟	7	1.63	1.33	1.00	1.00
C号棟	14	2.50	2.17	1.33	1.00
D号棟	18	1.30	1.00	1.80	1.20
平均		1.61	1.38	1.28	1.05

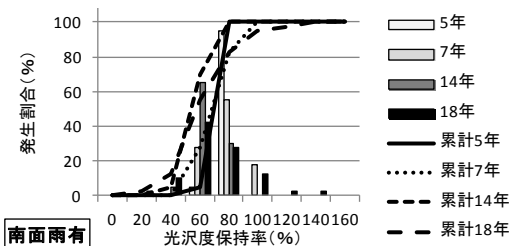


図-1 光沢度保持率比較(南面雨有り)

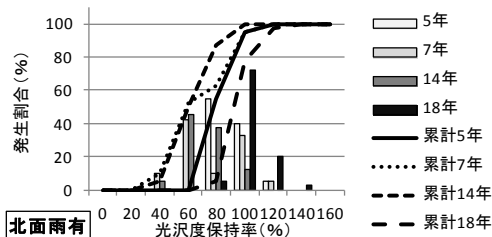


図-2 光沢度保持率比較(北面雨有り)

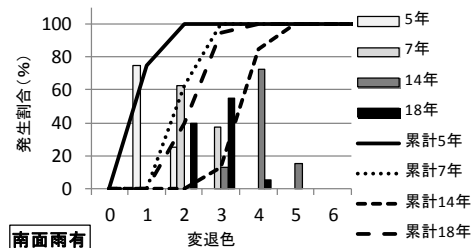


図-5 変退色比較(南面雨有り)

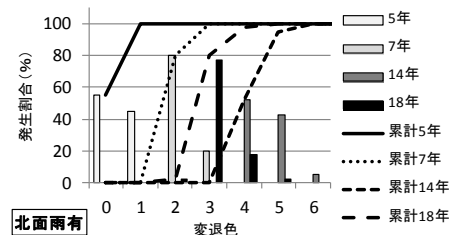


図-6 変退色比較(北面雨有り)

れているのではないかと考えられる。

また、方位による違いを見てみると、A号棟については全ての方位について劣化が進んでいないため同じ劣化度となっているが、他の調査対象については北面に比べて南面の方が白亜化の進行が顕著であることが確認できる。これは白亜化進行は日射による影響が強いためではないかと考えられる。

### 3.4 ひび割れ

図-7および図-8は2015年調査時の各建築物の南面雨掛り有りおよび北面雨掛り有りについてのひび割れを表したものである。経年数5年と7年で若干の劣化進行の後退が見られるが、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-9および図-10はA号棟およびC号棟の2012年から2015年のひび割れの推移を表したものである。A号棟においては若干ではあるものの経年の増加によるひび割れ劣化の進行が確認された。C号棟についても経年数14年については若干の逆行が見られたものの、全体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。

### 3.5 中性化深さ

図11に2014年度および2015年度に測定した中性化深さとその時点での経年数の結果を示す。また、「中性化深さの平均」「築年度から改修までの年数」「改修からの経年数」の関係を表-4に示す。表-4から、4棟共築年度がほぼ同様であるにも関わらず中性化深さの平均に大きな差があることが確認できる。これは改修時期の違いによるものであり、例えば、A号棟においては新築から改修までの年数が大きいため、その間に外装仕上げ材料が劣化して中性化抑制効果が大きく減少し、中性化が進行したためであると考えられる。

## 4. マルコフ連鎖モデルによる劣化予測

### 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-12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

表-4 中性化深さおよび塗装からの経年数

調査対象	調査年度	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	2014年	31年	4年	20.3mm
	2015年		5年	21.1mm
B号棟	2014年	29年	6年	15.8mm
	2015年		7年	18.3mm
C号棟	2014年	22年	13年	13.6mm
	2015年		14年	10.3mm
D号棟	2014年	18年	17年	6.2mm
	2015年		18年	5.1mm

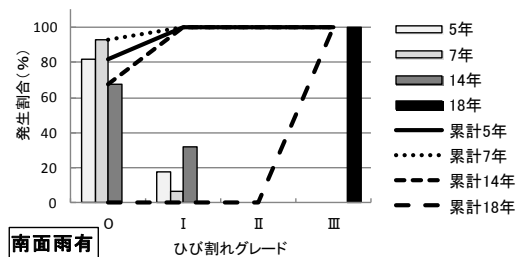


図-7 ひび割れ比較(南面雨有り)

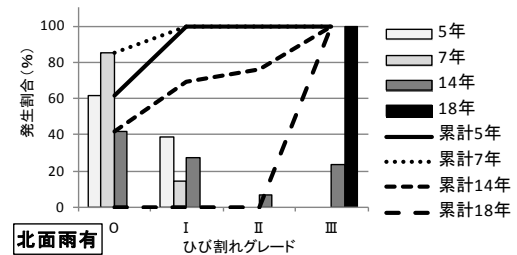


図-8 ひび割れ比較(北面雨有り)

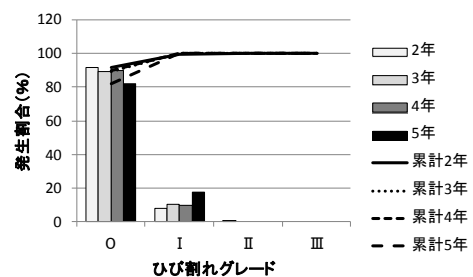


図-9 A号棟のひび割れ推移

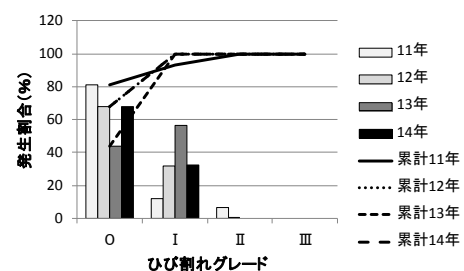


図-10 C号棟のひび割れ推移

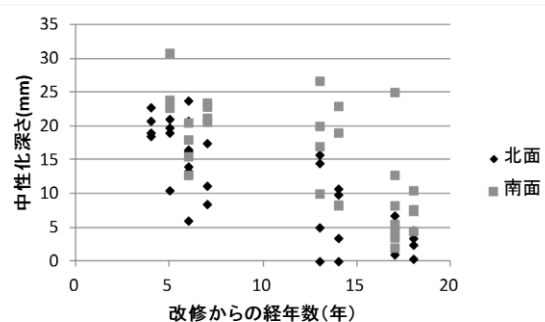


図-11 中性化深さ測定

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-13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。

#### 4.2 遷移確率の算出およびシミュレーション結果

2015年の調査結果を基にした南面雨掛かり有りのシミュレーション結果を図-14に示す。これは, 劣化グレード0~ⅢおよびⅡ+Ⅲの経年増加による発生割合の推移を表している。経年数ごとに遷移確率の値にバラツキがあったため, 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(表-5)。

表-5 シミュレーションに使用した遷移確率

遷移確率	$x_0$	$x_1$	$x_2$
平均値	0.126	0.171	0.097

#### 4.3 既往の研究との関連性

松田らにより<sup>1)</sup>, 外壁仕上材料の耐用年数は, 仕上材料の中性化速度係数が打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)の耐用年数をおおよそ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。

#### 5. 耐用年数の考え方

外装仕上げ材の耐用年数(ないしは寿命)については様々な考え方があるが, 筆者らはコンクリート建築物の構造上の耐用年数に大きな影響を与える中性化という現象に着目し, 外装仕上げ材の中性化抑制効果が「ある基準以下」になる時点その外装仕上げ材の耐用年数であると考えている。そこで筆者らは, 外装仕上げ材の劣化現象である, 光沢度保持率低下・変退色・白亜化・ひび割れに注目し, それぞれの劣化現象の相関性および中性化との関連性についての研究をおこなってきた。<sup>2)</sup>

一方, 耐用年数を定めるべき中性化抑制効果現象の程度についても様々な考え方ができる。例えば, 外装仕上げ材単独の中性化抑制効果のみに注目し, 中性化抑制効果が一定値以下になる点を耐用年数とする考えである。

また, コンクリート構造物自体の中性化進行状況に注目し, 中性化深さが一定値以上になる点をその構造物の耐用年数とした上で, その構造物に要求される耐用年数や外装仕上げ材の塗り替え回数等から逆算して外装仕上げ材の耐用年数を割り出す方法も考えられる。

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

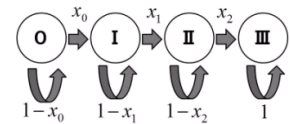


図-12 劣化進行概念

図-13 劣化進行行列式

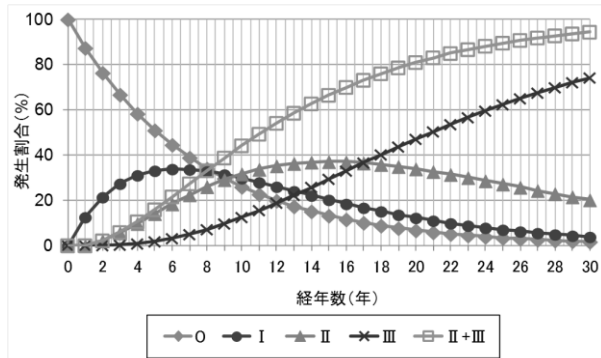


図-14 シミュレーション結果(ひび割れ・南面)

### 6. 仕上げ材自体の中性化抑制効果に注目した耐用年数

#### 6.1 累積超過劣化度について

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>。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,  $N$ は外装仕上げ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),  $L$ は外装仕上げ材料の耐用年数(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。

#### 6.2 中性化深さと累積超過劣化度の関係

耐用年数を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表-6および図-15に示す。図-15に示されるように, 今回の調査結果では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。この結果は, 築年数と改修回数が同一であったとしても, 改修時期を耐用年数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いる。

表-6 累積超過劣化度と中性化深さの関係

調査対象	調査年度	累積超過劣化度 (耐用年数 13 年)	累積超過劣化度 (耐用年数 0 年)	中性化深さの平均
A 号棟	2014	5.61	10.59	20.3mm
	2015	5.61	10.60	21.1mm
B 号棟	2014	4.56	9.13	15.8mm
	2015	4.56	9.18	18.3mm
C 号棟	2014	1.59	5.52	13.6mm
	2015	1.63	5.77	10.3mm
D 号棟	2014	0.89	4.82	6.2mm
	2015	1.07	5.22	5.1mm

図-15 の耐用年数を 13 年と仮定した時の累積超過劣化度と中性化深さの平均の線形近似を見ると、y 軸との交点が 4.98mm となっていることがわかる。これは実際には経年数 13 年以前から中性化が進んでいたためであり、耐用年数時(13 年)の塗膜が健全な状態ではなかったとみなされてしまう。

一方、耐用年数を 0 年と仮定した時の線形近似では y 軸との交点がマイナスであり、x 軸との交点が 1.54 であることがわかる。これは累積超過劣化度 1.54 までは「中性化が進行していなかった=外装仕上材料が健全な状態であった」ことを表している。しかし、累積超過劣化度 1.54 に対応する(塗替えを行わなかった場合)経年数は約 15 年であり、この時点までは外装仕上材料が中性化から外壁を十分に保護していたものとみなされてしまう。

### 6.3 耐用年数の設定について

前述のように、耐用年数を 13 年と設定した場合は耐用年数以前に中性化が進んでいたことが確認でき、耐用年数を 0 年に設定した場合は耐用年数より大きく経過した時点から中性化が進み出すことが確認できた。これは「耐用年数=中性化が顕著に進行しはじめる時点」という仮定と矛盾している。

そこで、この矛盾を出来る限り小さくするような耐用年数の設定についての考察を行う。中性化深さと累積超過劣化度の関係において、近似した直線と x 軸との交点が示す累積超過劣化度に対応する経年数と等しくなるような耐用年数を設定することが理想的である。このような耐用年数であれば、塗替えを行わなかった場合を想定しても、耐用年数までは中性化が進行せず、それ以降は中性化が進行することを表し、矛盾が解消される。しかし、図-14 および式(1)から見て取れるように、累積超過劣化度はマルコフ連鎖モデルによりシミュレーションされた曲線の積分値であるため、外装仕上げ材の塗替えをしなかった場合を想定すると、経年数に対して加速度的に上昇する傾向にある。また、設定した耐用年数に到達するまでは全く累積超過劣化度が増加しないという特徴も持っており、耐用年数をこのような数字に正確に設定することは困難であると考えられる。

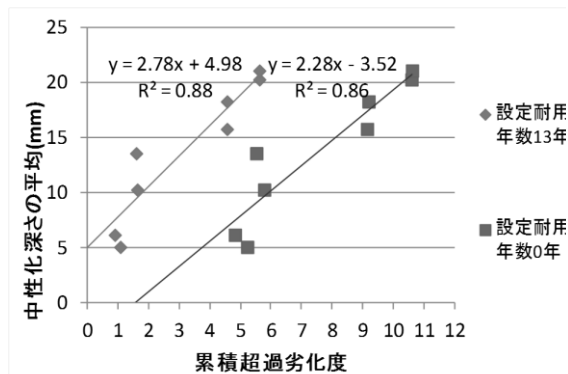


図-15 累積超過劣化度と中性化深さの関係

表-7 耐用年数と X 軸 Y 軸交点の関係

設定する耐用年数 (年)	X 軸との交点 (中性化深さ 0mm における累積超過劣化度)	Y 軸との交点 (累積超過劣化度 0 における中性化深さ) (mm)
6	0.71	-1.63
7	0.31	-0.70
8	-0.13	0.29
9	-0.56	1.31
10	-0.96	2.31

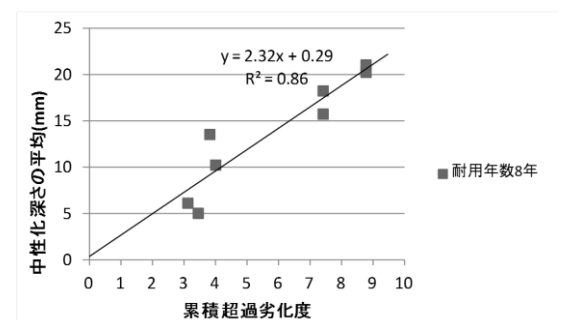


図-16 累積超過劣化度と中性化深さの関係 (8 年)

そこで、近似した直線が原点(中性化深さ 0mm, 累積超過劣化度 0)に限りなく近づくような耐用年数を設定することを考える。表-7 に設定する耐用年数と、中性化深さと累積超過劣化度の関係の近似式が x 軸と y 軸にそれぞれ交差する点の関係を示す。

原点への近さについて X 軸交点と Y 軸交点のどちらの近さを優先するかという問題もあったが、今回はどちらの場合でも耐用年数を整数値として 8 年と設定することで原点に近い結果となった。図-16 に耐用年数を 8 年とした時の累積超過劣化度と中性化深さの関係を示す。

累積超過劣化度と中性化深さの関係が原点付近においても線形であると仮定した場合、耐用年数が 8 年の場合において上記の関係が成立することがわかる。

以上により、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 年を挙げることができる。

## 7.建築物の要求耐用年数と外装仕上げ材の耐用年数

外装仕上げ材が施されたコンクリートの中性化に関する式として(2)がある<sup>3)</sup>。

$$D = A_c \left( \sqrt{T + R^2} - R \right) \quad (2)$$

ここで、D は中性化深さ(mm)、Ac はコンクリートの中性化速度係数、T は経年数(年)、R は外装仕上げ材の中性化抵抗(mm/年<sup>1/2</sup>)である。

特定のコンクリート建築物に 100 年の耐用年数が要求された場合、100 年目以降に中性化が鉄筋のかぶり深さに到達されるような中性化抵抗 R を持った外装仕上げ材を選定することによって要求は満たされる。しかしながら実環境下において劣化していく仕上材の R の値は必ずしも一定ではない。このことから上記の考え方を準用すると、最低限、中性化抵抗 R を下回らないように塗り替えていく、または仕上材の中性化抑制効果を定期的に評価することにより中性化抵抗値 R と同等となる時点を外装仕上げ材の耐用年数と考えることもできる。

## 8. 累積超過劣化度に関連する仕上材の劣化度の評価方法に向けた検討

ここでは実建築物における仕上材の経年劣化現象を本論で検討した仕上材のひび割れと中性化を関連付けて評価するための一手法として、ひび割れによる外装仕上材の表層透気性の変化に着目して検討を行う。

### (1) 建物の概要

表-8 に示す 9 棟の鉄筋コンクリート造の団地について調査箇所を定め、同位置にてひび割れの目視調査および表層透気試験を行った。

### (2) 表層透気試験の概要

表層透気試験の手法としてトレント法を採用した。外部と内部の圧力を等しく制御することで、外部からの空気の流入を排除し、内部チャンバー下からの栓流によるチャンバー内の経過時間と気圧変化量から、物体表層の透気係数を求める手法である。

### (3) 測定結果と考察

図-17 にひび割れグレードと表層透気試験の経年変化を示す。時間の経過に伴い、ひび割れグレードと透気係数が増加していることがわかる。これは経年により外装仕上材料の結合材が劣化してひび割れが発生し、ひび割れ部分から空気が通りやすくなり透気性が増加したためと考えられる。既存 RC 建築物の表層透気係数と中性化速度係数の関係に一定の相関が求められることを示した田中らの論文<sup>4)</sup>を引用して本知見を検討することにより、中性化抵抗 R が経年的に変化する外装仕上げ材において、ひび割れ等の劣化と中性化抑制効果を表層透気性に関連付けることができれば、対応する図-14 のような

表-8 調査対象

名称	築年数(年)	外装仕上げ材
A 団地	11, 14, 18	吹き付けタイル
B 団地	13, 16, 18	複層仕上塗材(E 厚型凸部処理)
C 団地	7, 9, 11	吹付タイル E 厚型

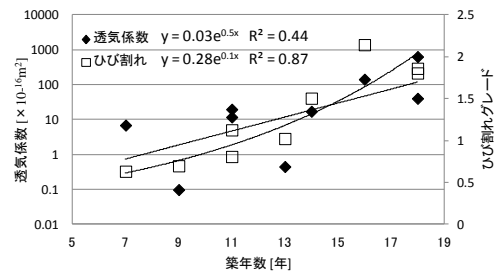


図-17 ひび割れと透気係数の経年変化

マルコフ連鎖モデルを使用したシミュレーション結果に基づいて累積超過劣化度に反映し耐用年数の適切な評価を行うことが可能と考えられる。

この点についての検討を実地調査を中心としたデータの蓄積によって図っていくことが今後の課題と考える。

## 9.まとめ

実建築物のひび割れ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および耐用年数の関係について検討した。

今回は比較的少ないデータでの検討であったが、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。

## 謝辞

本研究の一部は、日本建築学会材料施工委員会耐用年数予測小委員会(主査 本橋健司芝浦工業大学教授)の活動として行われたものであり、深謝の意を表します。

## 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
- 2) 越中谷光太郎他, 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外壁を対象とした劣化調査, 建築学会学術講演会梗概集(東海), pp.597-598, 2015.9
- 3) 馬場明夫, 千歩修: 各種の表層面をもつコンクリートの中性深さ推定方法に関する一考察, コンクリート工学年次論文報告集, 9-1, pp.333-338, 1987.6
- 4) 田中 章夫, 今本 啓一: 表層透気性による既存 RC 構造物の中性化予測に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 691 号, 1539-1545, 2013.9