

マルコフ連鎖モデルを用いた外装仕上塗材の劣化予測および  
中性化抑制効果に着目した耐用年数評価に関する研究

平成 31 年 3 月

越中谷 光太郎

## 目次

第1章 序論	p. 1
1.0 abstract	p.1
1.1 研究の背景	p.1
1.2 研究の目的	p.2
1.3 本論文の構成	p.2
第2章 既往の研究	p.7
2.0 abstract	p.7
2.1 はじめに	p.7
2.2 中性化予測式	p.7
2.2.1 $\sqrt{t}$ 則	p.7
2.2.2 浜田式	p.8
2.2.3 岸谷式	p.8
2.2.4 白山式	p.9
2.2.5 依田式	p.9
2.2.6 馬場式	p.10
2.2.7 李・梶田式	p.10
2.3 まとめ	p.11
第3章 実建築物に施工された外装仕上塗材の劣化調査	p. 13
3.0 abstract	p.13
3.1 はじめに	p.13
3.2 同一環境に建てられた建築物に施された外装仕上塗材の劣化データの収集	p.13
3.2.1 調査対象	p.13
3.2.2 調査個所	p.15
3.2.3 調査方法	p.17
3.2.4 調査結果および考察	p.24
3.3 まとめ	p.36
第4章 マルコフ連鎖モデルを用いた劣化予測手法の提案	p. 37
4.0 abstract	p.37
4.1 はじめに	p.37
4.2 外装仕上塗材の各種劣化の予測可能性についての検討	p.39
4.3 マルコフ連鎖モデルについて	p.41

4.4	マルコフ連鎖モデルによる劣化予測手法の提案	p.42
4.5	まとめ	p.45
<b>第5章 ひび割れと表層透気性の関係についての検討</b>		
5.0	abstract	p.47
5.1	はじめに	p.47
5.2	実験室レベルでの検証	p.49
5.2.1	実験の目的	p.49
5.2.2	実験の概要	p.49
5.2.3	表層透気性試験の概要	p.49
5.2.4	試験用基板の選定	p.50
5.2.5	実験結果	p.51
5.3	実建築物の調査	p.53
5.3.1	調査の目的	p.53
5.3.2	調査対象の概要	p.53
5.3.3	調査結果	p.53
5.4	外装仕上塗材の表層ひび割れと外壁の表層透気性に関する考察	p.54
5.5	まとめ	p.56
<b>第6章 外装仕上塗材の表層ひび割れと中性化抑制効果の関係についての検討</b>		
6.0	abstract	p.58
6.1	はじめに	p.58
6.2	累積ひび割れグレードについて	p.60
6.3	中性化深さと累積ひび割れグレードの関係性について	p.62
6.4	異なる環境に建てられた建築物についての検討	p.64
6.4.1	調査対象および調査方法	p.64
6.4.2	調査結果	p.65
6.4.3	累積ひび割れグレードと中性化深さの関係性について	p.68
6.5	まとめ	p.70
<b>第7章 外装仕上塗材の耐用年数に関する提案</b>		
7.0	abstract	p.72
7.1	はじめに	p.72
7.2	コンクリートの中性化を最大限抑えるための外装仕上塗材の耐用年数	p.74
7.3	建築物の所有者が要求する年数まで鉄筋への中性化の進行を抑制するための外装仕上塗材の耐用年数	p.78

7.4 現在認知されている耐用年数に対する考察	p.80
7.4.1 塗替えの容易性に着目した耐用年数との比較	p.80
7.4.2 経済性に着目した耐用年数との比較	p.81
7.4 まとめ	p.82
<b>第8章 結論および今後の課題</b>	<b>p. 84</b>
8.0 abstract	p.84
8.1 はじめに	p.84
8.2 結論	p.84
8.3 今後の課題	p.86

## 第1章 序論

### 1.0 Abstract

In recent years, the demand for longer service life of buildings including existing stocks as well as new buildings is increasing. There is a way of thinking that the service life of reinforced concrete buildings is when neutralization of concrete reaches rebar, so it is common to paint exterior finish coating on concrete. Many studies are being conducted on the influence of exterior finish coating material on the suppression of neutralization of concrete.

Because the neutralization inhibiting effect of the exterior finish coating material decreases by the action of environmental degradation external force, it is an important task to predict the service life of the exterior finish coating material. However, because deterioration of the exterior finish coating has a complex effect on “the kind of material”, “deteriorating external force”, “the part to be used”, “construction level”, “maintenance level”, “maintenance and maintenance”, and so on, it is difficult to predict degradation by accumulating those factors.

Therefore, in this study, we investigate the deterioration state of actual buildings and propose a deterioration prediction method of exterior finish paint by using Markov chain model which is one of probability theories. In addition, we propose a service life focusing on the neutralization inhibiting effect of the exterior finish coating material on the concrete.

### 1.1 研究の背景

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中、建築物の長寿命化の評価に必要となる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。主要な建物構造とされる鉄筋コンクリート造建築物の寿命を決定する一つの要因としてコンクリートの中性化が挙げられるが、その上に外装仕上塗材を施工することにより中性化を抑制し長寿命化を図ることが一般的である。仕上塗材がコンクリートの中性化抑制に及ぼす影響については既に馬場、千歩、長谷川、梶田ら他多くの研究者によって、実証的な研究[1][2][3]がなされている。

外装仕上塗材は環境劣化外力が作用し経年と共に躯体に対する保護機能が低下していくため、外装仕上塗材の耐用年数を予測することも重要な課題となっている。しかし、外装仕上塗材の劣化には材料の種類、劣化外力、使用される部位、施工水準、維持保全の水準などが複合的に影響を与え合うため、それらの要因を積み上げて劣化を予測することは困難である。

さらに、外装仕上塗材がどのような状態になった時を寿命と考えるかによってその耐用年数は異なってくる。日本建築学会編集の「建築物の耐久計画に関する考え方」[4]における

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。一方で、外装仕上塗材には鉄筋コンクリートに対して躯体保護性能が求められているため、中性化抑制効果が一定値よりも少なくなった時に寿命を迎えたと考えることもできる。しかし、外装仕上塗材の劣化と中性化抑制効果の減少の関係性についても不明な点が多い。

## 1.2 研究の目的

本研究では、実建築物の劣化状態を調査し、その結果をもとに確率論の1つであるマルコフ連鎖モデルを利用することで外装仕上塗材の劣化予測手法の検討を行うとともに、外装仕上塗材の躯体コンクリートに対する中性化抑制効果に着目し、躯体コンクリートの中性化進行を最小限に抑制するための外装仕上塗材の耐用年数、および、建築物の所有者が要求する年数まで鉄筋への中性化の進行を抑制するための外装仕上塗材の耐用年数評価手法について提案を行った。

## 1.3 本論文の構成

本論は全8章で構成される。以下に各章の概要を示す。

### 第1章「序論」

研究背景や目的について述べる。

### 第2章「既往の研究」

コンクリート単体および仕上塗材が施されたコンクリートの中性化について、主な既往の研究について述べる。

### 第3章「実建築物に施工された外装仕上塗材の劣化調査」

本章では、実際に生活が営まれている4棟のコンクリート造建築物の外壁に施されている外装仕上塗材について、非破壊調査（光沢度、色差、白亜化、目視によるひび割れ確認）および破壊試験（中性化深さ）を実施し、その結果について述べる。調査対象はそれぞれ近隣に建てられているため、置かれている環境についてはほぼ同一であり、日射量、降雨量、気温、湿度等の劣化外力は同等であると考えることができる。

### 第4章「マルコフ連鎖モデルを用いた劣化予測手法の提案」

本章では、将来予測のための確率モデルであるマルコフ連鎖モデルについて説明している。この確率モデルは厳密なメカニズムや作用因子が不明確な場合に使用されることがあるが、実環境に晒された外装仕上塗材には日射量、降雨量、気温、湿度、管理状況、施工水

準等々の無数の劣化要因が相互に関連しながら作用していることもあり、本稿では外装仕上塗材の劣化予測に対しマルコフ連鎖モデルを採用している。また、この確率モデルには不可逆性という特徴があるが、非破壊調査の結果の中で不可逆性を有する劣化は外装材のひび割れであることが確認されたため、本章では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を行い、その結果について述べる。

#### 第5章「ひび割れと表層透気性の関係についての検討」

前章では外装仕上塗材のひび割れの予測手法を示したが、本章においてはひび割れと中性化抑制効果の関係性について検討を行っている。田中らによる既往の研究[5]によりコンクリート造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認められることが報告されているため、外装仕上塗材のひび割れと外壁の表層透気係数の間に相関を確認することで、外装仕上塗材のひび割れと中性化抑制効果の間に関係性がある可能性があるかを確認することが本章の目的となっている。

まず、実験室レベルの検証として、ケイカル板に施工した塗料に対して擬似的なひび割れを作成し、ひび割れの長さや表層透気性の関係について確認する。次に、実建築物について外装仕上塗材のひび割れと表層透気性の調査を行うことにより、実建築物レベルでの検証をおこなう。

#### 第6章「外装仕上塗材の表層ひび割れと中性化抑制効果の関係についての検討」

本章では、第3章で開発したマルコフ連鎖モデルに基づいた外装仕上塗材のひび割れに対する予測手法、および、第4章で得られた外装仕上塗材のひび割れと中性化抑制効果の関係性についての知見を用いて、経年によって減少する外装仕上塗材の中性化抑制効果を加味した躯体コンクリートの中性化進行予測手法について検討を行う。ここで、経年による外装仕上塗材のひび割れの進行による中性化進行速度の増加を考慮するために、平均ひび割れグレードの経年による積み上げを累積ひび割れグレードと仮定し、実建築物の中性化深さとの関係性について、第3章で調査を実施した同一環境に建てられた建築物だけでなく、異なる環境に建てられた建築物についても確認を行った。

#### 第7章「外装仕上塗材の耐用年数に関する提案」

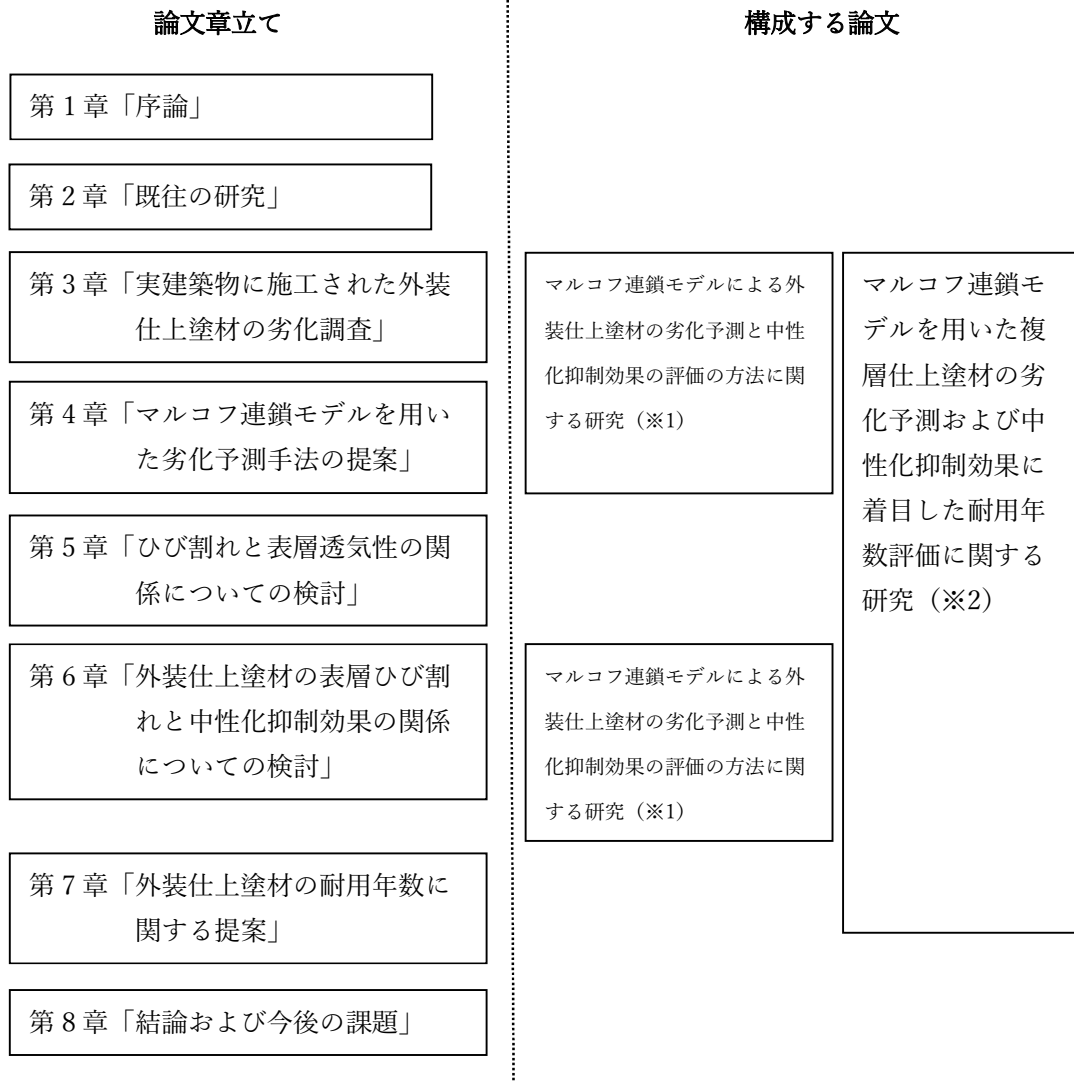
本章では、第3章から第6章で得られた知見を用いて外装仕上塗材の耐用年数に関して「コンクリートの中性化を最大限に抑えるための外装仕上塗材の耐用年数」および「建築物の所有者が要求する年数まで鉄筋への中性化の進行を抑制するための外装仕上塗材の耐用年数」に関する検討を行う。また、外装仕上塗材の耐用年数に関しては、改修の容易性や経済性に価値観を置いて設定されることが多いが、それらの耐用年数と本研究で得られた中性化抑制効果に基づいた耐用年数を比較することにより、現在普及している耐用年数が躯体保護性能の上でどのような位置づけとなっているかを確認する。

## 第 8 章「結論及び今後の課題」

本研究で得られた知見について要約し，今後の検討課題を述べる。



「マルコフ連鎖モデルを用いた外装仕上塗材の劣化予測および  
 中性化抑制効果に着目した耐用年数評価に関する研究」



※1 越中谷光太郎，今本啓一，本橋健司，清原千鶴：マルコフ連鎖モデルによる外装仕上塗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，第38巻，第1号，729-734頁（2016年6月）

※2 越中谷光太郎，今本啓一，清原千鶴：マルコフ連鎖モデルを用いた複層仕上塗材の劣化予測および中性化抑制効果に着目した耐用年数評価に関する研究，日本建築学会構造系論文集，第83巻，第754号，1735-1743頁（2018年12月）

【第1章における参考文献】

- 1)馬場明生,千歩修:各種の表面層をもつコンクリートの中性化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,pp.333-338,1987
- 2)長谷川拓哉,千歩修,大久保孝昭,古賀純子:建築用仕上塗材の中性化抑制効果に関する研究,日本建築学会構造系論文集,No. 609,pp.23-30, 2006. 11
- 3)唐沢智之,榊田佳寛,李 榮蘭:既存建物の調査結果に基づく仕上塗材の中性化抑制効果と透気係数による中性化予測に関する研究,日本建築学会構造系論文集,Vol. 76, No. 669, pp.1885-1890, 2011. 11
- 4)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
- 5)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, pp.1539-1545,2013.9

## 第2章 コンクリートの中性化に関する既往の研究

### 2.0 Abstract

There are many ways of thinking as to what the state of the reinforced concrete building is considered as the end of life. For reinforced concrete buildings, there is an idea that the service life is the time when the neutralization of concrete reaches the rebar and the corrosion of the rebar starts, so many studies are conducted on the neutralization of concrete. In this chapter, we will extract research on the neutralization of reinforced concrete, which is being mainly studied in Japan, and summarize the outline as a past study.

### 2.1 はじめに

鉄筋コンクリート造建築物がどのような状態になった時に寿命を迎えるかについては多くの価値観が存在する。それは美観の低下、設備の陳腐化、漏水、躯体の強度低下等々が挙げられるが、外壁の躯体コンクリートの中性化が鉄筋まで到達して鉄筋の腐食が開始される時期を寿命する意見も有力とされており、コンクリートの中性化については数多くの研究が行われている。また、外壁の表層には外装仕上塗材が施されていることが多いが、これは建築物の美観のためだけでなく、紫外線、熱、降雨、風、飛来物、雪、塩分、二酸化炭素等の劣化外力から外壁を保護する効果を持っており、外壁の躯体コンクリートの中性化については外装仕上塗材の保護効果を加味した研究についても数多く実施されている。また、仕上塗材を加味した研究の多くは仕上塗材が健全な状態のままであることを前提としているが、実建築物の外壁に施工された仕上塗材は数々の劣化外力に晒されることにより経年と共に劣化し、躯体コンクリートを保護する能力は低下していくことが知られており、仕上塗材の劣化を加味した躯体コンクリートの中性化についても研究が進められている。

本章では、主として国内で研究が行われている鉄筋コンクリートの中性化に関する研究を抽出し、既往の研究としてその概要を整理する。

### 2.2 中性化予測式について

#### 2.2.1 $\sqrt{t}$ 則

大気中の炭酸ガスによるコンクリート表面からの中性化は、Fick の法則によるコンクリート内部の未中性化領域への炭酸ガス定常拡散によって得られる式 2.2-1、いわゆる $\sqrt{t}$  則に従い進行することが広く知られている。中性化速度係数 A の値が大きいほどそのコンクリートは中性化に対する抵抗が低いことを表す。しかしながら中性化速度係数 A は外的、内的要因によって定まる係数であり、古くから、理論的考察、室内試験、暴露試験および既存建築物調査等の様々な観点から中性化予測式の提案が行われている。

$$X = A\sqrt{t} \quad (\text{式 2.2-1})$$

$$A = \sqrt{\frac{2D \cdot C_0}{H}} \quad (\text{式 2.2-2})$$

ここに,

- X : 中性化深さ(mm)
- A : 中性化速度係数(mm/ $\sqrt{\text{year}}$ )
- t : 材齢(year)
- D : 拡散係数(mm/year)
- C<sub>0</sub> : 表面の炭酸ガス濃度(mol/mm<sup>3</sup>)
- H : 単位体積当たりの Ca(OH)<sub>2</sub>量(kg/m<sup>3</sup>)

### 2.2.2 浜田式

式 2.2-3 は、1907 年から行われた自然暴露試験 20 年後の調査結果および、浜田の実施した促進試験並びに自然暴露試験結果と理論的考察から提案したものである。セメントの種類、骨材の種類、表面活性剤に着目し、各使用材料毎に係数が定められている。

$$C = \sqrt{\frac{R}{k}} \sqrt{t} \quad (\text{式 2.2-3})$$

$$R = \gamma_c \cdot \gamma_a \cdot \gamma_s \quad (\text{式 2.2-4})$$

$$k = 0.3(1.15 + 3x)/(x - 0.25)^2 \quad (\text{式 2.2-5})$$

ここに,

- C : 中性化深さ(mm)
- t : 材齢(year)
- R : 中性化率 (-)
- $\gamma_c$  : セメントの種類による定数(-)
- $\gamma_a$  : 骨材の種類による定数(-)
- $\gamma_s$  : 表面活性剤の有無(-)
- x : 水セメント比(-)

### 2.2.3 岸谷式

浜田式を基として、詳細な促進試験及び自然暴露試験の結果から提案されている。岸谷式における強度上の水セメント比 x は表面活性剤を用いることにより増加する空気量に対応する強度低下を見込んで補正されている。

$$C = R \sqrt{\frac{(x-0.25)}{0.3(1.15+3x)}} \sqrt{t} \quad (x \geq 0.6) \quad (\text{式 2.2-6})$$

$$C = R \sqrt{\frac{(4.6x-1.76)}{7.2}} \sqrt{t} \quad (x \leq 0.6) \quad (\text{式 2.2-7})$$

ここで、

- C : 中性化深さ(mm)
- x : 水セメント比(-)
- R : 中性化率 (-)
- t : 材齢(year)

#### 2.2.4 白山式

中性化に関する多くの研究を総合的に比較検討して評価式が提案されている。

$$C = \sqrt{\frac{(x-38)^2}{5000\alpha\beta\gamma\delta\varepsilon}} \sqrt{t} \quad (\text{式 2.2-8})$$

ここで、

- C : 中性化深さ(mm)
- x : 水セメント比(-)
- $\alpha$  : 骨材・混和剤による係数(-)
- $\beta$  : セメントによる係数(-)
- $\gamma$  : 施工程度による係数(-)
- $\delta$  : 仕上げによる係数(-)
- $\varepsilon$  : 室内外による係数(-)
- t : 材齢(year)

#### 2.2.5 依田式

高炉セメント A, B, C 種およびポルトランドセメントを用いた種々のコンクリートの 20 年間の自然暴露試験の結果を基に提案されている。

	屋内	屋外
高炉セメント A 種	$t = \alpha \beta \gamma \frac{117t^2}{(100x-25)^2} C^2$	$t = \alpha \beta \gamma \frac{182t^2}{(100x-27)^2} C^2$
高炉セメント B 種	$t = \alpha \beta \gamma \frac{95t^2}{(100x-26)^2} C^2$	$t = \alpha \beta \gamma \frac{207t^2}{(100x-24)^2} C^2$

高炉セメント C種	$t = \alpha \beta \gamma \frac{68t^2}{(100x - 28)^2} C^2$	$t = \alpha \beta \gamma \frac{251t^2}{(100x - 19)^2} C^2$
ポルトランド セメント	$t = \alpha \beta \gamma \frac{262t^2}{(100x - 18)^2} C^2$	$t = \alpha \beta \gamma \frac{155t^2}{(100x - 36)^2} C^2$

ここに、

- t : 材齢(year)
- x : 水セメント比(-)
- $\alpha$  : コンクリートの品質係数(-)
- $\beta$  : 中性化遅延 (抑制) 硬化係数(-)
- $\gamma$  : 環境条件係数(-)
- C : 中性化深さ(mm)

### 2.2.6 馬場式

仕上塗材が施されたコンクリートの中性化進行モデルを定義し、理論的考察により提案された。仕上塗材による中性化抑制効果を生じた抵抗 R として評価している。またモルタルなどのアルカリ成分を含むセメント系材料と塗料などの非セメント系材料の場合でモデルが異なり、それぞれの評価式を提案している。

$$\text{セメント系: } C = A(\sqrt{t} - R) \quad (\text{式 2.2-9})$$

$$\text{非セメント系: } C = A(\sqrt{t + R^2} - R) \quad (\text{式 2.2-10})$$

ここに、

- C : 中性化深さ(mm)
- A : 中性化速度係数(mm/ $\sqrt{\text{year}}$ )
- R : 中性化抵抗( $\sqrt{\text{year}}$ )
- t : 材齢(year)

### 2.2.7 李・樹田式

Fick の法則によるコンクリート内部の未中性化域への炭酸ガス定常拡散を基に、表面にモルタル仕上げなどのセメント系材料を仕上塗材に持つコンクリートの中性化進行予測式を理論的考察と共に提案している。

$$C = A(\sqrt{(t - T) + R^2} - R) \quad (\text{式 2.2-11})$$

$$T = (d/A_f)^2 \quad (\text{式 2.2-12})$$

ここに、

- C : 中性化深さ(mm)
- A : 中性化速度係数(mm/ $\sqrt{\text{year}}$ )
- t : 材齢(year)
- R : 中性化抵抗( $\sqrt{\text{year}}$ )
- T : コンクリートの拡散係数( $\sqrt{\text{year}}$ )
- $A_f$  : 中性化抵抗(mm/ $\sqrt{\text{year}}$ )
- d : 仕上げ塗厚(mm)

### 2.3 まとめ

本章においてはコンクリートの中性化に関わる既往の研究について紹介したが、コンクリート単体または外装仕上塗材が健全である場合のコンクリートの中性化については多くの研究がなされているが、経年劣化に伴う外装仕上塗材の中性化抑制効果の減少を加味したコンクリートの中性化進行については研究が少ないのが現状である。その理由については幾つか考えられるが、建築物は置かれた環境、建築物自体の形状、塗付けられた外装仕上塗材の種類、外装仕上塗材の施工の精度、外装仕上塗材の管理状況などが建築物毎にそれぞれ異なり、また、それらの劣化要因が相互に複雑に影響を与えるため、劣化要因を1つ1つ積み上げて外装仕上塗材の劣化予測を行うことが非常に困難であることが最も大きな理由の一つであると予想される。そこで本研究では、種々の劣化要因について個別に検討を行うのではなく、種々の劣化要因が影響した結果である実建築物の外壁の劣化状況を調査し、その結果を基に確率論の1つであるマルコフ連鎖モデルを適応することにより、外装仕上塗材の劣化予測を試みる。

【第2章における参考文献】

- 1) 浜田稔：コンクリートの中性化と鉄筋の腐食，セメント・コンクリート論文集，No.272，1969
- 2) 岸谷孝一：鉄筋コンクリートの耐久性，鹿島建設技術研究所出版，1963
- 3) 日本建築学会：コンクリートの調合設計・調合管理・品質検査指針案・同解説，1976
- 4) 依田彰彦：高炉セメントコンクリートの中性化，セメント・コンクリート，No.429.1982.11
- 5) 馬場明生，千歩修：各種の表面層を持つコンクリートの中性化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，Vol.9，No.1，pp.333-338，1987
- 6) 李榮蘭，榊田佳寛：表層コンクリートの品質と中性化進行に関する解析的検討，日本建築学会構造系論文集，vol.75，No.649，pp.499-504，2010.5



### 第3章 実建築物に施工された外装仕上塗材の劣化調査

#### 3.0 abstract

It is difficult to predict deterioration of the exterior finish coating material due to influence each other factors such as the type of material, the external force of deterioration, the part to be used, the level of construction and the level of maintenance. Therefore, in this chapter, investigate the exterior finishing paint applied to the outer wall of the building and confirm how various deterioration progresses.

We surveyed 4 buildings of reinforced concrete apartment building from 2012 to 2016. Because the 4 buildings are located in the neighborhood, the environmental conditions are considered to be almost the same. The exterior finish paint is repaired once in each case, but the repair years are different. We investigated the gloss retention rate, discoloration, chalking and visual cracking and the neutralization depth by core harvesting on the outer wall of these buildings. The findings obtained in this chapter are shown below.

- (1) Regularity was not confirmed for gloss retention, discoloration and chalking.
- (2) Progress of regular deterioration was confirmed for cracks.
- (3) Neutralization of the south surface was progressing with respect to the north face. The number of years passed since renovation of the exterior finish paint is smaller, the progress of neutralization progresses is smaller.

#### 3.1 はじめに

外装仕上塗材の劣化には材料の種類、劣化外力、使用される部位、施工水準、維持保全の水準などが複合的に影響を与え合うため、それらの要因を積み上げて劣化を予測することは困難である。そこで、本章では実際に生活に供されている建築物の外壁に施されている外装仕上塗材を調査し、各種劣化がどのように進行するのかを確認する。

#### 3.2 同一環境に建てられた建築物に施された外装仕上塗材の劣化データの収集

##### 3.2.1 調査対象

表 3.2-1 に示す鉄筋コンクリート造の団地の4棟について2012年度から2016年度の調査を行った。なお、「改修からの年数」は改修から2016年調査時までの外装仕上塗材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。外装仕上塗材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。

表 3.2-1 調査対象

	調査対象建築物			
	A	B	C	D
構造	鉄筋コンクリート造建築物			
設計基準強度	18 N/mm <sup>2</sup>	18 N/mm <sup>2</sup>	21 N/mm <sup>2</sup>	21 N/mm <sup>2</sup>
建築年度	1978 年	1977 年	1977 年	1977 年
改修年度	2010 年	2008 年	2001 年	1997 年
改修からの年数	6 年	8 年	15 年	19 年
外装仕上塗材の種類 (新築時)	複層仕上塗材 E			
外装仕上塗材の種類 (改修時)	合成樹脂エマルジョンペイント			
外装仕上塗材の色	白			

### 3.2.2 調査箇所

調査箇所を表 3.2-2 および表 3.2-3 に示す。

表 3.2-2 A 号棟および B 号棟における調査箇所

A 号棟		光沢度	色差	白亜化	ひび割れ	B 号棟		光沢度	色差	白亜化	ひび割れ			
2012 (2)	雨有	南	○	○	○	2012 (4)	雨有	南	○	○	—	○		
		北	○	○	○			○	○	—	○			
		西	—	—	—			—	—	—	—			
	雨無	東	—	—	—		雨無	東	—	—	—	—		
		南	—	—	—			南	—	—	—	—		
		北	—	—	—			北	—	—	—	—		
2013 (3)	雨有	西	—	—	—	2013 (5)	雨有	西	—	—	—	—		
		東	—	—	—			東	—	—	—	—		
		南	○	○	—			○	南	○	○	—	○	
	雨無	北	○	○	—		○	雨無	北	○	○	—	○	
		西	—	—	—		—		西	○	—	—	—	
		東	—	—	—		—		東	—	—	—	—	
2014 (4)	雨有	南	○	—	—	2014 (6)	雨有	南	○	—	—	○		
		北	○	—	—			○	雨無	北	—	—	—	○
		西	—	—	—			—		西	—	—	—	—
	雨無	東	—	—	—		雨無	東		—	—	—	—	
		南	○	—	—			○	南	○	—	—	○	
		北	○	—	—			○	北	○	—	—	○	
2015 (5)	雨有	西	—	—	—	2015 (7)	雨有	西	—	—	—	—		
		東	○	○	○			○	雨無	東	—	—	—	—
		南	○	○	○			○		南	○	○	○	○
	雨無	北	○	○	○		○	雨無		北	○	○	○	○
		西	—	—	—		—		西	—	—	—	—	
		東	—	—	—		—		東	—	—	—	—	
2016 (6)	雨有	南	○	○	○	2016 (8)	雨有	南	○	○	○	○		
		北	○	○	○			○	雨無	北	○	○	○	○
		西	○	○	○			○		西	○	○	○	○
	雨無	東	○	○	○		○	雨無		東	○	○	—	○
		南	○	○	○		○		南	○	○	○	○	
		北	○	○	○		○		北	○	○	○	○	
		西	—	—	—			西	—	—	—			
		東	—	—	—			東	—	—	—			

表 3.2-3 C号棟およびD号棟における調査箇所

C号棟		光沢度	色差	白亜化	ひび割れ	D号棟		光沢度	色差	白亜化	ひび割れ								
2012 (11)	雨有	南	○	○	○	○	2012 (15)	雨有	南	○	○	○							
		北	○	○	○	○			北	○	○	○	○						
		西	○	○	○	○			西	○	○	○	○						
	雨無	東	○	○	—	○		雨無	東	○	○	○	○						
		南	—	—	—	—			南	○	—	○	○						
		北	○	○	○	○			北	○	○	○	○						
2013 (12)	雨有	西	—	—	—	2013 (16)	雨有	西	—	—	—	雨有	東	○	—	○	○		
		東	○	○	—			○	南	○	○		—	○					
		南	○	○	—			○	北	○	○		—	○					
	雨無	南	—	—	—		○	雨無	西	—	○	—	—	雨無	東	○	○	—	○
		北	○	○	—		○		南	—	○	—	○						
		西	—	—	—		—		北	○	○	—	○						
2014 (13)	雨有	東	—	—	—	2014 (17)	雨有	東	○	○	—	—	雨有	南	○	—	○	○	
		南	○	—	—			○	北	○	—	—		○					
		北	○	—	—			○	西	—	—	—		—					
	雨無	南	○	—	—		○	雨無	東	—	—	—	—	雨無	東	—	—	—	—
		北	○	—	—		○		南	○	—	—	—						
		西	—	—	—		—		北	○	—	—	—						
2015 (14)	雨有	東	—	—	—	2015 (18)	雨有	東	—	—	—	—	雨有	南	○	○	○	○	
		南	○	○	○			○	北	○	○	○		○					
		北	○	○	○			—	西	—	—	—		—					
	雨無	南	○	○	○		○	雨無	東	—	—	—	—	雨無	南	○	○	○	○
		北	○	○	○		○		北	○	○	○	○						
		西	—	—	—		—		西	—	—	—	—						
2016 (15)	雨有	東	—	—	—	2016 (19)	雨有	東	—	—	—	—	雨有	南	○	○	○	○	
		南	○	○	○			○	北	○	○	○		○					
		北	○	○	○			○	西	○	○	○		○					
	雨無	南	○	○	○		○	雨無	東	○	○	—	○	雨無	南	○	○	○	○
		北	○	○	○		○		北	○	○	○	○						
		西	○	○	○		○		西	○	○	○	○						

### 3.2.3 調査方法

以下に調査対象の外壁に対して実施した調査項目を示す。

#### ① 光沢度保持率

光沢度は、塗膜の凹凸の凸の部分で光沢度計を用いて測定する。光沢度計の原理を図 3.2-1 に示す。周囲の明るさや色の影響を受けにくい近赤外線をパルス発光し、レンズにより平行光として測定面を照射する。測定面からの反射光をレンズで受光器に集光し、反射光の中で鏡面反射方向の光だけを受光するように受光器前面にスリットを設けている。受光器の出力をプリアンプで帯域増幅し、整流して光沢度に変換し、光沢値として表示する。光沢度計を図 3.2-2 のように壁面に設置し、光沢度を測定する。

規格 JIS K 5600-4-7

塗料一般試験方法 - 第 4 部 塗膜の視覚特性 - 第 7 節 鏡面光沢度

規格 JIS Z 8741

鏡面光沢度 - 測定方法

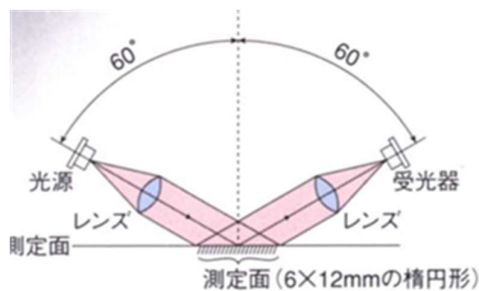


図 3.2-1 光沢度計の原理



図 3.2-2 光沢度の測定

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。

光沢度保持率は式 3.2-1 のようにインシャルの光沢度に対する測定点の光沢度の割合で示す。インシャルとしては改修直後の測定点を用いることが好ましいが、今回の調査では改修直後の光沢度を測定することができないため、それぞれの調査対象について最も劣化していないと推測される測定点の 2012 年度における光沢度をインシャルとして扱う。

$$\text{光沢度保持率} [\%] = \frac{\text{測定値の光沢度}}{\text{インシャル}} \times 100 \quad \dots (\text{式 3.2-1})$$

## ② 色差

変退色は JIS 規格に従い、色差計を用いて  $L^*a^*b^*$  表色系の各要素の値を測定する。図 3.2-3 のように発光部を壁面に垂直に当て、光を照射する。図 3.2-4 に色差計の原理を示す。試料で吸収を受けた光スリットを通して回析格子へ入り分光される。その光が多段構成の受光器へ入り、電流が生じ、電子回路でデジタル化される。そのデジタル化されたデータを図 3.2-5 のように分析することで、 $L^*, a^*, b^*$  の各数値が算出される。 $L^*$  軸は明度、 $a^*$  軸は緑色～赤色、 $b^*$  軸は青色～黄色を表す。 $a^*, b^*$  軸共に数値が大きいほど彩度が高いと言える。

規格 JIS Z 8722

色の測定方法 - 反射及び透過物体色



図 3.2-3 色差の測定

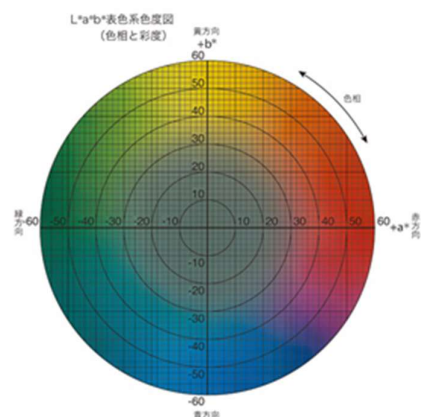


図 3.2-4 カラーモデル

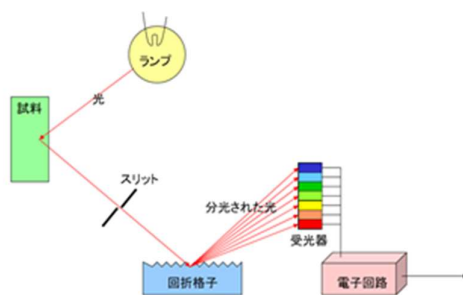


図 3.2-5 色差計の原理

色差は  $L^*a^*b^*$  色を用い、式(3.2-2)で示される。

$$E = \sqrt{\{(Li - L)^2 + (ai - a)^2 + (bi - b)^2\}} \quad \dots \text{式(3.2 - 2)}$$

ここに、  $Li, ai, bi$  : イニシャル

$L, a, b$  : 測定値

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

白亜化は JIS 規格に従い、幅 5cm の透明なビニールテープを調査対象となる建築物の壁面に貼り、仕上塗材料表面の粉末を採取する。それを黒い紙に貼り、規格に基づき図 3.2-6 の白亜化グレード表を基準に目視での白亜化等級の分類を行う。グレード 1 は白亜化がほとんど認められない状態であり、グレード 5 は白亜化が顕著に認められる状態である。

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」

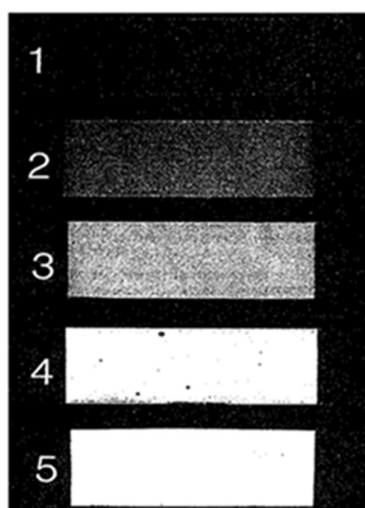


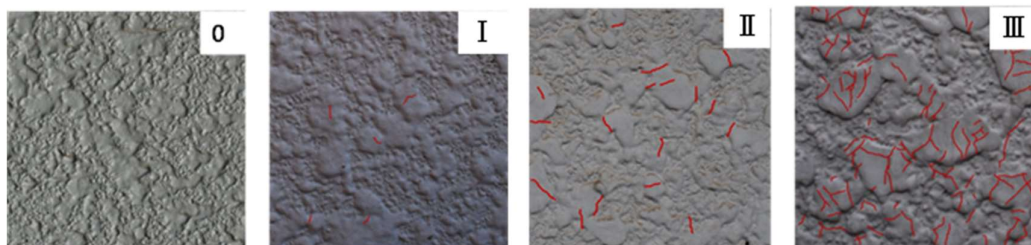
図 3.2-6 白亜化デグリー表

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

ひび割れは、目視で簡便に評価できる劣化事象である。ここでは、ひび割れの状態を図 3.2-7 に示す劣化グレード 0～Ⅲの 4 段階に分類し、この見本に基づいて劣化グレード分布を調査する。赤線はひび割れを示し、劣化グレードが高いほどひび割れが多くなり、劣化が進行しているものとする。



劣化グレード 0：ひび割れが目視できない。

劣化グレード I：1,2 本のひび割れが目視できる

劣化グレード II：単線のひび割れが 10 本程度分布する。

劣化グレード III：網目状のひび割れが全体に分布する。

図 3.2-7 ひび割れグレード

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する。

調査個所の選定は 2012 年調査時に仕上塗材の劣化状況を勘案せず、以下の①～③により実施し、2013～2016 年調査では、2012 年調査時とほぼ同様の箇所の測定を行った。

- ① 東西南北各面の雨掛かり有無部について、それぞれ 1～2 箇所を選定する。
- ② 選定箇所の周辺において、3 か所を選定し、20cm×20cm のサイズが収まるように写真撮影を行う。
- ③ 各写真を 5cm×5cm に切り出し、ひび割れグレードを判別する。

また、各建物における各ひび割れグレードの割合を式 3.2-3、式 3.2-4 を用いて求める。

ひび割れグレード(x)の割合

$$= \text{ひび割れグレード (x) の 調査箇所数} \div \text{全体の調査箇所数} \dots \text{式(3.2-3)}$$

平均ひび割れグレード = ひび割れグレード(0)の割合 × 0

+ひび割れグレード(I)の割合 × 1

+ひび割れグレード(II)の割合 × 2

+ひび割れグレード(III)の割合 × 3 ...式(3.2-4)

ここで、建築物の特定箇所での測定ではあるが、各建物について300点～600点程度の調査を調査箇所を有しているため、本論文においてはここで算出される各ひび割れグレードの割合が建物全体の状態を示しているものとする。

⑤ 中性化深さ

JISA 1152 に準じて、調査箇所においてコアの採取を行った後、測定面の処理を行い、ラッピングフィルムなどで測定面を密封する。これは、測定面を空気中に長時間放置しておくことで測定面が中性化して正確な中性化深さの測定が困難になるおそれがあるためである。

測定箇所は、コンクリート表面から赤紫色に呈色した部分までの距離を 0.5 mm の単位でノギスを用いて測定する。測定は、呈色した部分が安定してから行う。コンクリートが著しく乾燥していて赤紫色の呈色が不鮮明な場合には、フェノールフタレイン試薬を噴霧した測定面に噴霧器で水を少量噴霧する、または試薬を再度噴霧するなどして、発色が鮮明になってから測定を行う。測定位置に粗骨材の粒子がある場合には、両端の中性化位置を結んだ直線上で測定する。測定例を図 3.2-8 に示す。



図 3.2-8 中性化深さ測定例（フェノールフタレイン溶液噴射後）

### 3.2.4 調査結果および考察

#### ① 光沢度保持率

##### ①-1 各棟間の比較（光沢度保持率）

図 3.2-9 に 2016 年調査時の各建築物の東西南北面の光沢度保持率を示す。

全体的な傾向として改修からの経年数が 6 年から経年 15 年の建築物に関しては、どの方位においても経年と共に光沢度保持率が低下している様子が確認できる。しかし、経年 19 年の建築物については経年 15 年の建築物に対して光沢度保持率の変化に規則性が確認されなかった。これは、光沢度は塗膜表面の平滑さを表しているが、経年により塗膜表面が一定以上粗い状態になると光沢度低下の進行が収まり、表面の劣化状況においては逆に光沢度が上昇する場合もあるためであると考えられる。

なお、光沢度保持率が 100%を超えているデータがあるが、これはその建築物の 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ているためである。

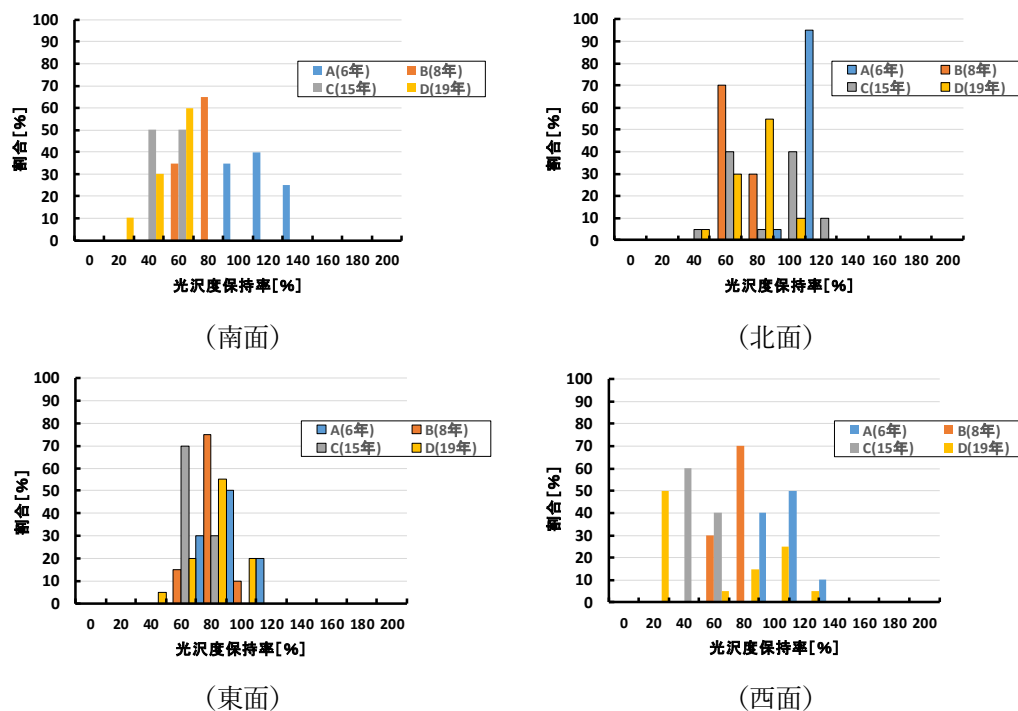


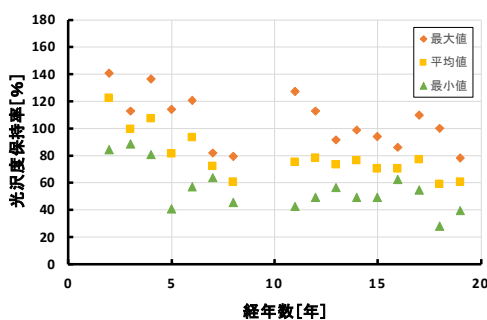
図 3.2-9 光沢度保持率比較（2016 年度調査）

①-2 最大値、最小値および平均値の経年による比較（光沢度保持率）

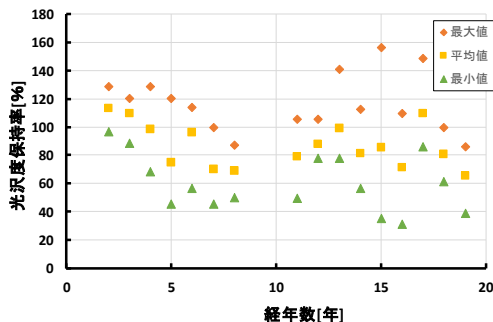
図 3.2-10 に 2012 年～2016 年時調査の各建築物の改修からの経年と光沢度保持率の最大値、最小値および平均値の比較を示す。

南面、北面共に改修からの経年数 10 年程度までは光沢度保持率が低下している様子が確認できるが、10 年以降については横ばいになっている。この傾向は、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 10 年程度）で低下の進行が緩やかになるためであると考えられる。

また、添田らにより光沢度保持率が 30%程度に低下するまでの年数が美観上の標準耐用年数となることが提案されており[6]、その観点に拠れば、最も劣化が著しい部位（光沢度保持率の最小値）の光沢度保持率が 30%程度に到達している南面 18 年、北面 16 年が今回の調査対象の美観上の耐用年数であると位置づけることができる。



(南面)



(北面)

図 3.2-10 光沢度保持率の比較（2012～2016 年調査）

## ② 変退色

### ②-1 各棟間の比較（変退色）

図 3.2-11 および図 3.2-12 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の動向を示す。

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、白亜化の調査結果（表-3.2.3-1）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。一方、図 3.2-11 に見られるように光沢度保持率は経年 10 年までにはある程度の低下が確認されており、これは仕上塗材表層が劣化し表層に凹凸ができてきているためであると考えられる。このことから、紫外線等により変退色が進んだ仕上塗材表層部分が経年と共に摩耗し、変退色が進んでいない部分が表層に現れることにより変退色の進行が後退している可能性が考えられる。

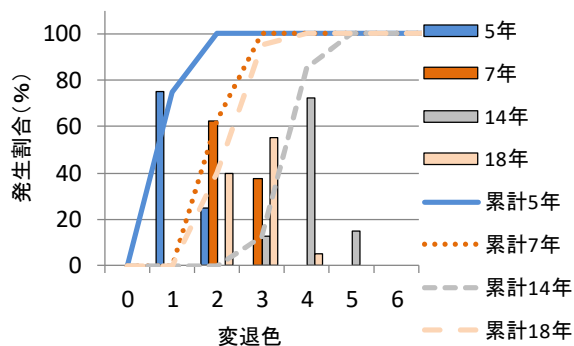


図 3.2-11 変退色比較（南面雨有り）

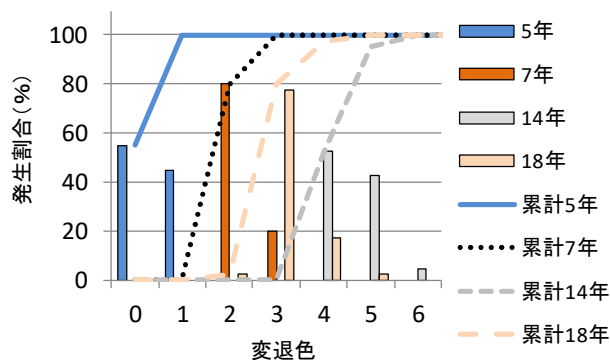


図 3.2-12 変退色比較（北面雨有り）

## ②-2 同一棟での比較（変退色）

図 3.2-13 に各棟の変退色の推移を示す。どの棟においても経年による変退色の進行に規則性を見出すことができなかった。

これは、紫外線等の影響で経年と共に塗膜自体も変色すると思われるが、それ以上に外部からの汚れの付着や、菌や植物の繁殖等により表面の色味が変化してしまうため、塗膜自体の経年に応じた変色を観測することが難しいためだと思われる。測定前の汚れ除去の徹底等の対策を講じる必要があると考えられる。

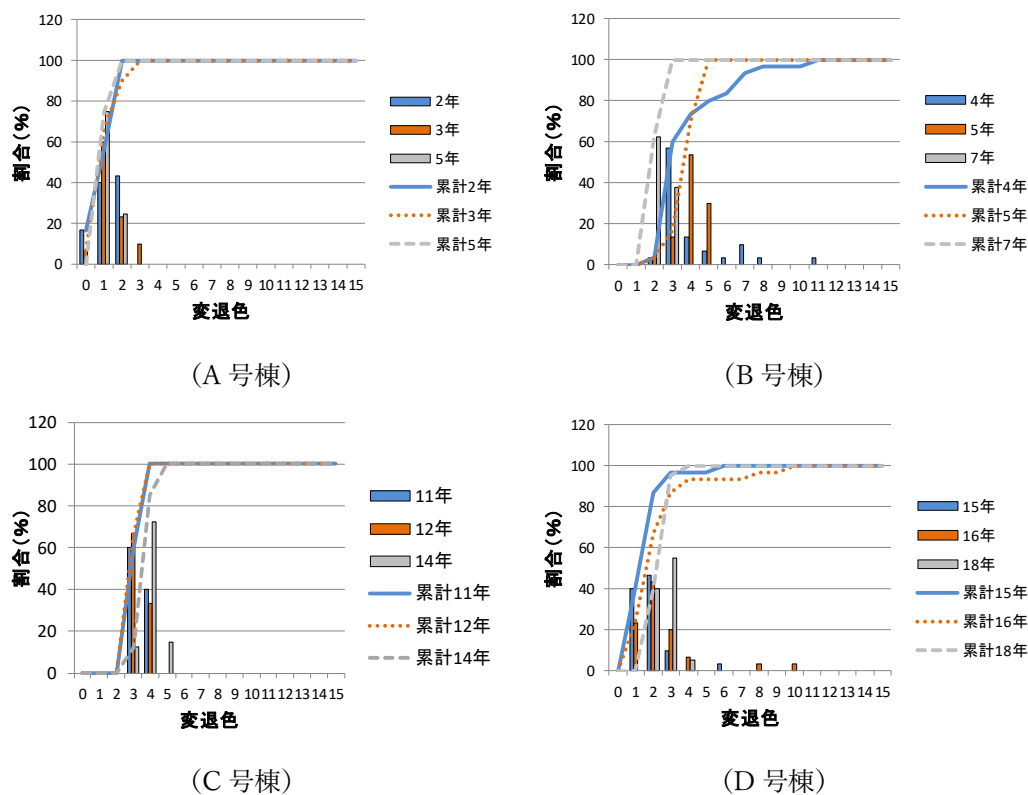
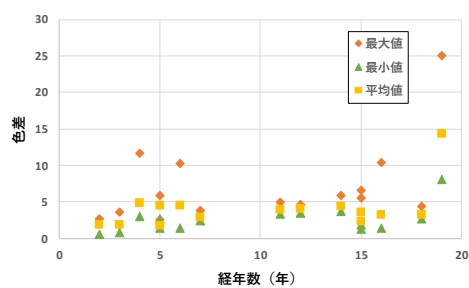


図-3.2-13 各棟毎の変退色

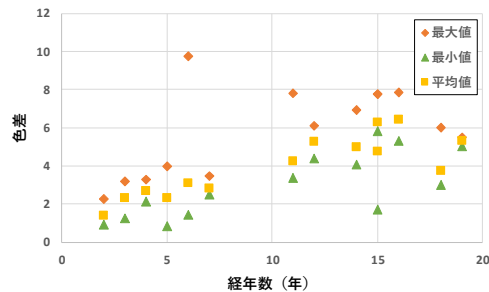
②-3 最大値、最小値および平均値の経年による比較（変退色）

図 3.2-14 に 2012 年～2016 年時調査の各建築物の改修からの経年と色差の最大値、最小値および平均値の比較を示す。

北面においては改修からの経年に伴って色差が緩やかに上昇している傾向が見られるが、南面においては改修からの経年が増加しても色差の上昇が確認されなかった。これは「②-1 各棟間の比較（変退色）」でも触れたように、南面においては紫外線等の影響により表層の摩耗が進行しやすいため、摩耗により変退色している表層部分が剥がれ落ち、変退色していない部分が表層に出てくるため色差低下が見られない可能性が考えられる。



(南面)



(北面)

図 3.2-14 色差の比較（2012～2016 年調査）



③ 白亜化

2016年度調査における白亜化の調査結果を表3.2.4～表3.2.7に示す。既に経年の若い6年でも白亜化は発生しており、経年による差はみられない。白亜化は経年6年以前の早い段階で発生することがわかった。しかし、発生後の白亜化進行速度は緩やかだと予測できる。

表3.2.4 白亜化 (A号棟)

方位	雨	測定位置	評価					平均	平均
			1	2	3	4	5		
西			2	2	2	2	2	2	2
東			2	2	2	2	2	2	2
南	有	右	2	2	2	2	2	2	2
		左	2	2	2	2	2	2	
北		右	2	2	2	2	2	2	2
		左	2	2	2	2	2	2	
西	無		データ無						
東			データ無						
南		右	2	2	2	2	2	2	2
		左	2	2	2	2	2	2	
北			2	2	1	2	1	1.75	1.6

表3.2.5 白亜化 (B号棟)

方位	雨	測定位置	評価					平均	平均
			1	2	3	4	5		
西		右	2	2	2	2	2	2	2
		左	2	2	2	2	2	2	
東	有		データ無						
南		右	2	2	2	2	2	2	2
		左	2	2	2	2	2	2	
北		右	2	2	2	2	2	2	2
	左	2	2	2	2	2	2		
西	無		データ無						
東			データ無						
南		右	2	2	2	2	2	2	2
		左	2	2	2	2	2	2	
北		右	2	2	2	2	2	2	2
	左	2	2	2	2	2	2		

表 3.2.6 白亜化 (C号棟)

方位	雨	測定位置	評価					平均	平均
西	有		2	2	2	2	2	2	2
東			2	2	2	2	3	2.2	2.2
南		右	3	3	3	3	3	3	2.5
		左	2	2	2	2	2	2	
北	右	2	2	2	2	2	2	2.5	
	左	3	3	3	3	3	3		
西	無		2	2	2	2	2	2	2
東			データ無						
南		右	3	3	3	3	3	3	2.5
		左	2	2	2	2	2	2	
北		右	2	2	2	2	2	2	2
	左	2	2	2	2	2	2		

表 3.2.7 白亜化 (D号棟)

方位	雨	測定位置	評価					平均	平均
			1	2	3	4	5		
西	有	右	2	2	2	2	2	2	2
		左	2	2	2	2	2	2	
東			データ無						なし
南			2	2	2	2	2	2	2
北		右	2	2	2	2	2	2	2
	左	2	2	2	2	2	2		
西	無		2	2	2	2	2	2	2
東			データ無						なし
南			2	2	2	2	2	2	2
北			2	2	2	2	2	2	2

④ ひび割れ

④-1 各棟間の比較

図 3.2-15 は 2016 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。全体の傾向として経年の増加による劣化の進行が確認された。

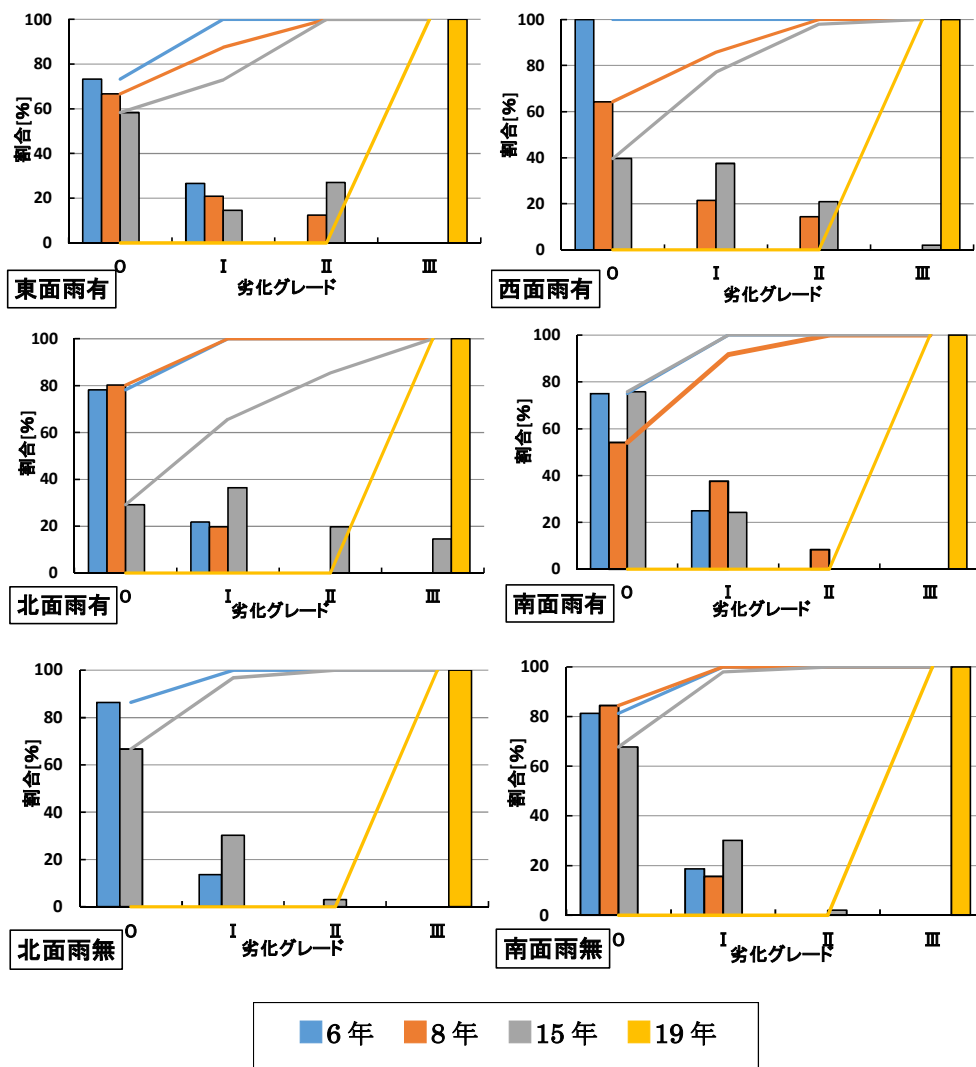


図 3.2-15 ひび割れ比較 (各棟間)

④-2 同一棟での比較

図 3.2-16 は各棟の 2012 から 2016 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。B～D 号棟についても一部に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。

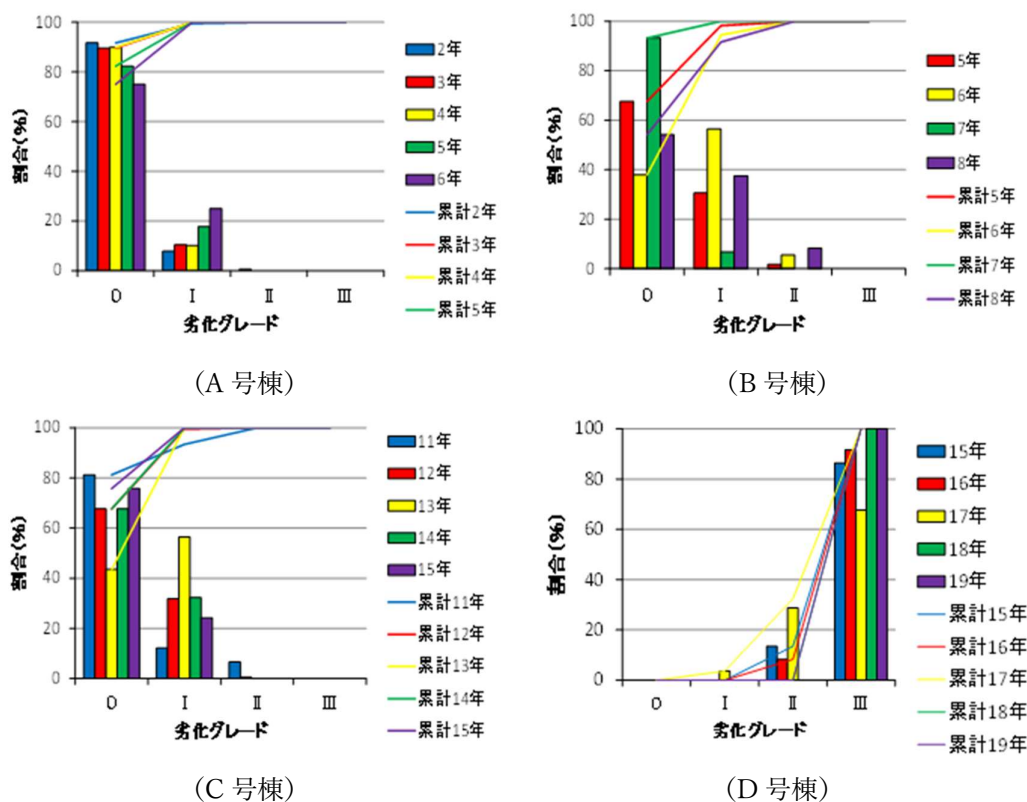


図 3.2-16 ひび割れの推移

#### ④-3 経年におけるひび割れグレードの平均

4棟の調査対象が同一の建築物であると仮定し、改修からの経年2年～19年のひび割れグレードの平均を図3.2-17および図3.2-18に示す。経年によりひび割れが増加していく傾向があり、特に経過年数10年頃からその傾向が著しく見られる。方位による劣化の相違は確認できなかったが、雨掛かりについては雨掛かり無し部に対して雨掛かり有り部の劣化が大きいことが確認された。

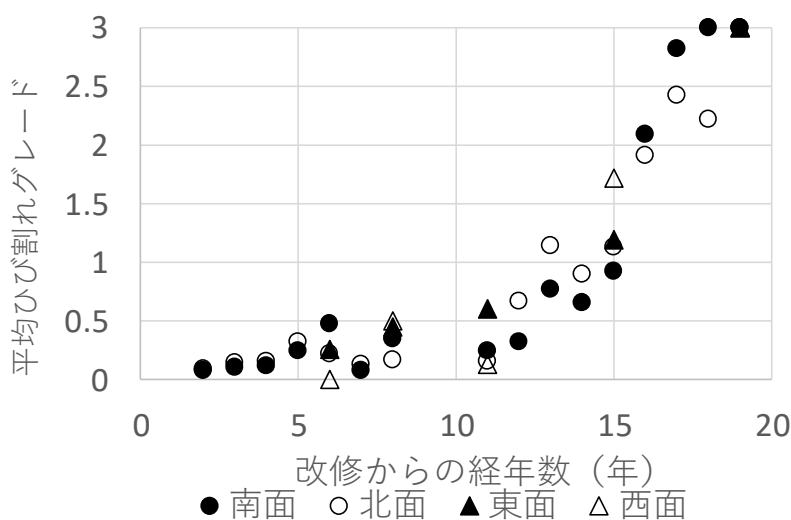


図 3.2-17 経年数におけるひび割れグレード (各方位)

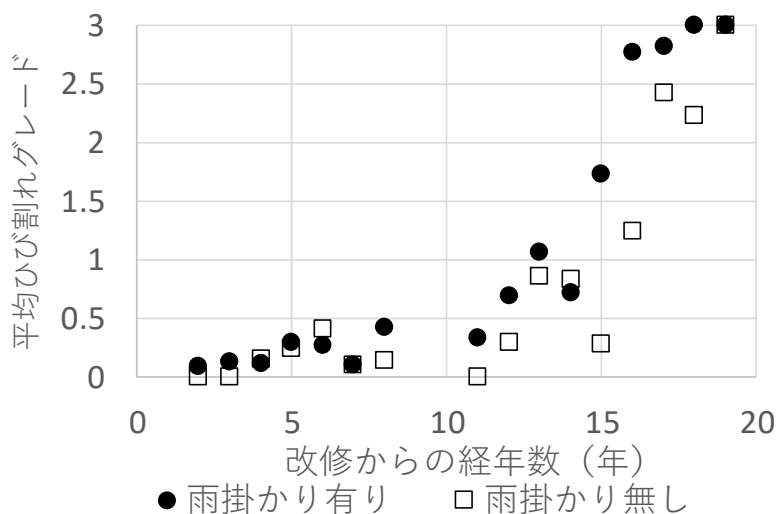


図 3.2-18 経年数における平均ひび割れグレード (雨掛かり有無)

### ⑤ 中性化

図 3.2-19 および図 3.2-20 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 3.2-8 に示す。

北面に対して南面の中性化が進行していることがわかる。これは、紫外線等により仕上塗材が劣化し、中性化抑制効果が低下したためであると考えられる。また、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であると考えられる。

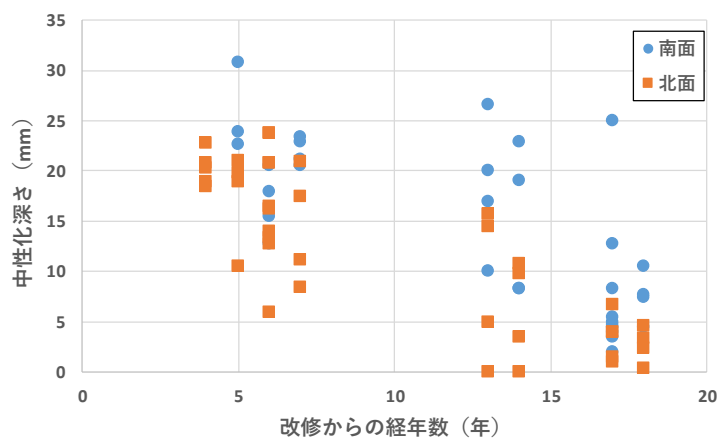


図 3.2-19 中性化深さ (方位毎)

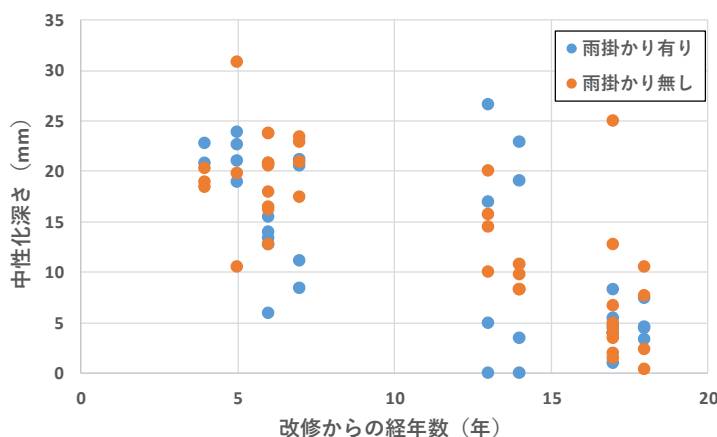


図 3.2-20 中性化深さ (雨掛かり有無)

表 3.2-8 中性化深さ及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	25.9mm
B 号棟	2014年	29年	6年	16.8mm
	2015年		7年	18.3mm
C 号棟	2014年	22年	13年	13.6mm
	2015年		14年	8.3mm
D 号棟	2014年	18年	17年	5.8mm
	2015年		18年	5.1mm

### 3.3 まとめ

本章では同一環境に建てられている 4 棟の建築物の外壁について、非破壊試験である光沢度保持率、変退色、白亜化および目視によるひび割れ調査を、破壊試験としてコア採取による中性化深さ調査を実施した。本研究より得られた知見を以下に示す。

- (1) 光沢度保持率、変退色および白亜化については、改修からの経年増加に対する規則性が確認できなかった。
- (2) ひび割れについては、2012 年から 2016 年における同一棟による調査、および、2016 年における各棟間の調査において、改修からの経年増加に対して劣化の進行がおおむね確認された。また、劣化の進行は経年に対して単純増加であり、不可逆性が確認された。
- (3) 中性化については、北面に対して南面の中性化が進行していた。また、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であると考えられる。
- (4) 本章で得られた結果は建築物における特定箇所の結果であるため、更に確実な傾向を確認するためには建築物全体を網羅するような調査が望まれる。しかし、ひび割れについては各建物の調査箇所が 300～600 点となっているため、本論文においては建物全体の傾向を表しているとみなして検討を進める。



## 4. マルコフ連鎖モデルを用いた劣化予測手法の提案

### 4.0 abstract

In this research, we aim to investigate the reduction of neutralization suppression effect due to deterioration of exterior finishing paint, and as the first step in chapter 3, deterioration of exterior finish paint applied to actual building We investigated the situation. However, when considering the deterioration of the exterior finishing coating material, it is necessary to predict deterioration situation of the exterior finish coating material at any arbitrary number of years. Therefore, in this chapter, we propose selection of deterioration type and possibility of prediction of deterioration which may be predicted from the result of degradation survey of exterior finish paint applied to actual building in chapter 3. The findings obtained in this chapter are shown below.

- (1) Regularity was not confirmed for gloss retention, discoloration and chalking.
- (2) Progress of regular deterioration was confirmed for cracks. It was also confirmed that it had irreversible characteristics.
- (3) The Markov chain model, which is one of probability theories, has the feature of irreversibility, and it was considered to be suitable as a method for predicting cracks.

### 4.1 はじめに

本研究においては外装仕上塗材の劣化に伴う中性化抑制効果の低下の検討を目的としており、その最初の段階として第 3 章にて実建築物に施されている外装仕上塗材の劣化状況の調査を行った。しかし、実建築物の調査で得られるデータは調査時の劣化状況であり、経年により進行する外装仕上塗材の劣化および中性化抑制効果を検討する際には、任意の経年数における外装仕上塗材の劣化状況を予測する必要がある。そこで本章では、第 3 章での実建築物に施工された外装仕上塗材の劣化調査の結果から予測の可能性がある劣化種類の選定、および、劣化予測手法の提案について、図 4.1-1 に示すフローチャートに則り検討を進める。

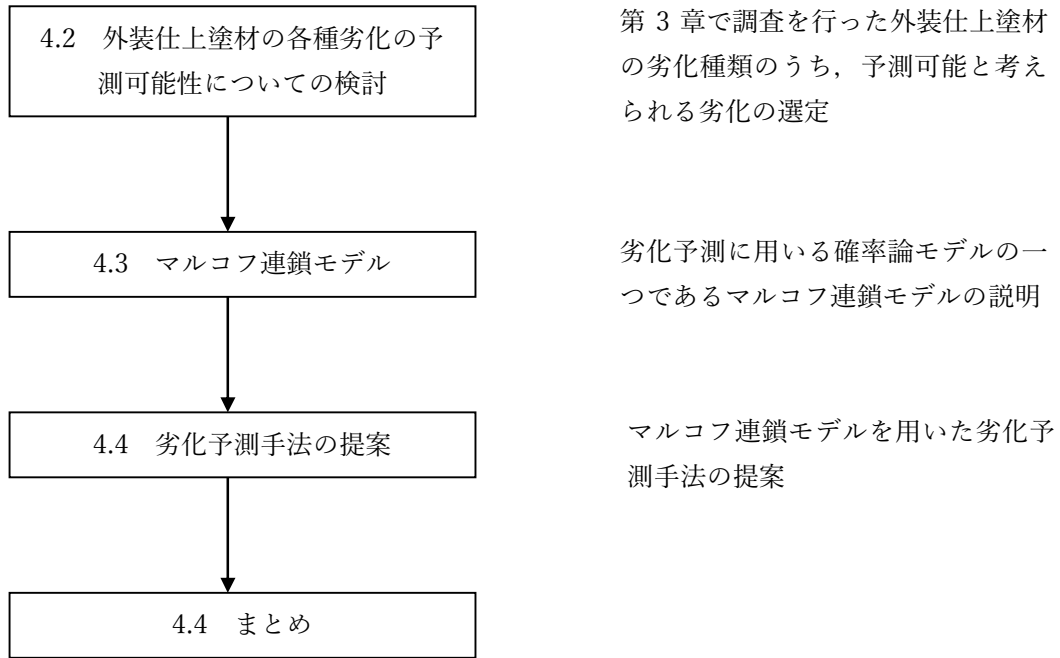


図 4.1-1 第 4 章フローチャート

## 4.2 外装仕上塗材の各種劣化の予測可能性についての検討

第3章において実建築物に施されている外装仕上塗材について、非破壊で調査可能な以下の各種劣化についての調査を行った。

- ① 光沢度（光沢度保持率）
- ② 色差（変退色）
- ③ 白亜化
- ④ 表層ひび割れ

「①光沢度（光沢度保持率）」については、図3.2-11のように経年数10年程度までは光沢度保持率が低下している様子が確認できるが、10年以降については横ばいになっている。この傾向は、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10年程度）で低下の進行が緩やかになるためであると考えられる。、色差および白亜化については、改修からの経年増加に対する規則性が確認できなかった。

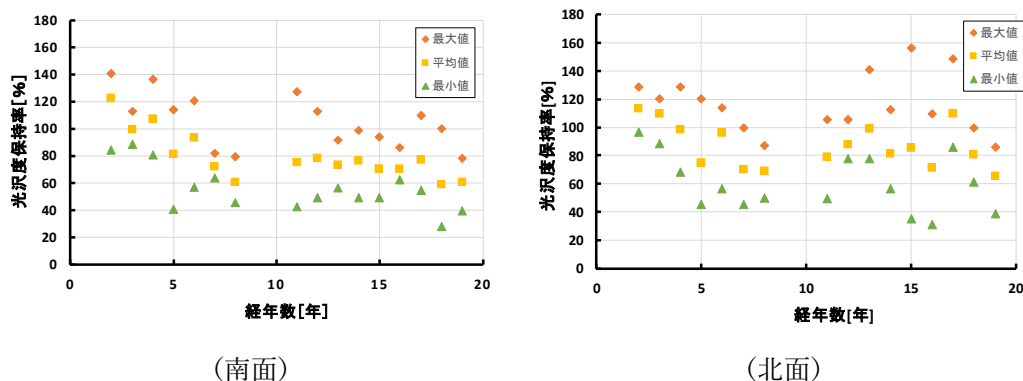
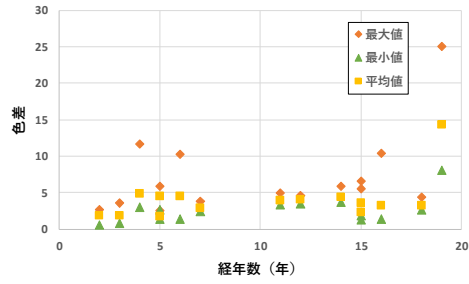


図3.2-10（再掲） 光沢度保持率の比較（2012～2016年調査）

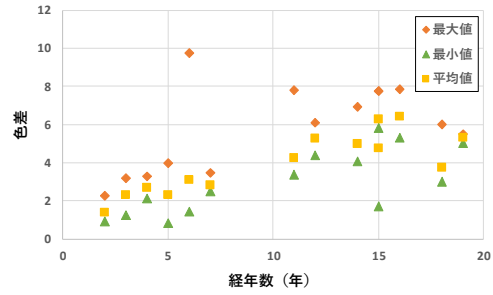
「②色差（変退色）」については図3.2-15のように、北面においては改修からの経年に伴って色差が緩やかに上昇している傾向が見られるが、南面においては改修からの経年が増加しても色差の上昇が確認されなかった。

また、「③白亜化」については、表3.2-3～表3.2-6のように、経年による劣化の違いを確認することは出来なかった。

一方、「④ひび割れ」については、図3.2-17および図3.2-18のように、改修からの経年と劣化の進行の間に相関性があり、改修からの経年の増加に対して純粋に劣化が進行していることが確認できる。このことより、外装仕上塗材の表層ひび割れは予測可能である可能性が示されたと考えられる。



(南面)



(北面)

図 3.2-14 (再掲) 色差の比較 (2012~2016 年調査)

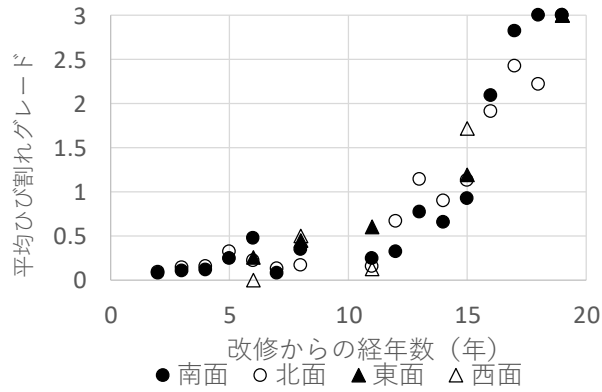


図 3.2-17 (再掲) 経年数におけるひび割れグレード (各方位)

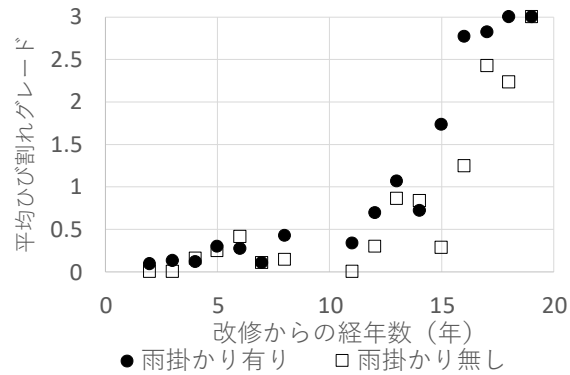


図 3.2-18 (再掲) 経年数における平均ひび割れグレード (雨掛かり有無)

### 4.3 マルコフ連鎖モデルについて

マルコフ連鎖モデルは将来予測のための確率モデルであり、厳密なメカニズムの積上げによる予測が困難な場合や作用因子が不明確な場合に活用されるマクロモデルであるが、近年では建設分野における屋根防水[1]、土木分野における橋梁のメンテナンス[2]、下水管の耐用年数評価予測[3][4]、交通ネットワークの維持保全[5]等で成果を挙げている。

ここでは、図 4.3-1 に示すような O~III までの劣化グレードにおいて、ある期間 t 経過後、その地点の劣化グレードから次のグレードに移る確率を遷移確率  $x_n$  とし、任意時間の劣化グレードの分布がシミュレーションできるものとする。このモデルは不可逆性の特徴（「O→I」「I→II」「II→III」に進行するが、「III→II」「II→I」「I→O」に戻ることはない）を持ち、図 4.3-2 の行列式で表現される。

調査対象の劣化現象である「ひび割れ」は、図 3.2.4-12 および図 3.2.4-13 に示されるとおり経年とともに進行する傾向が見られ、本研究で用いるマルコフ連鎖モデルの不可逆性の特徴と合致する。

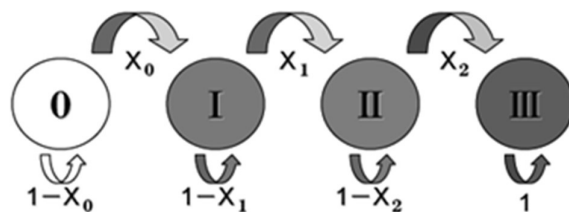


図 4.3-1 マルコフ連鎖モデルの概念図

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

O~III : t 年後の劣化割合, t : 経過年数(年),  $x_0 \sim x_2$  : 遷移確率

図 4.3-2 マルコフ連鎖の行列式

#### 4.4 マルコフ連鎖モデルによる劣化予測手法の提案

2012年～2016年のひび割れ調査の結果を基にした遷移確率の平均値を表4.4-1～表4.4-5に示す。また、その遷移確率を用いたマルコフ連鎖モデルによるひび割れの劣化予測結果を図4.4-1～図4.4-5に示す。

「経年0年」の時点では、ひび割れグレード0が建物全体を占めているが、経年が進むにつれてひび割れグレードIの割合が増加していき、それにつれてひび割れグレード0が減少していく。更に経年が進むにつれてひび割れグレードIIの割合が増加していき、ひび割れグレード0およびIが減少していく。最終的には最も劣化度が大きいグレードであるひび割れグレードIIIの割合が増加していくのが本モデルの特徴である。

表 4.4-1 遷移確率（全体）

	$x_0$	$x_1$	$x_2$
最大値	0.384	0.396	0.400
最小値	0.016	0.015	0.004
平均値	0.108	0.116	0.178

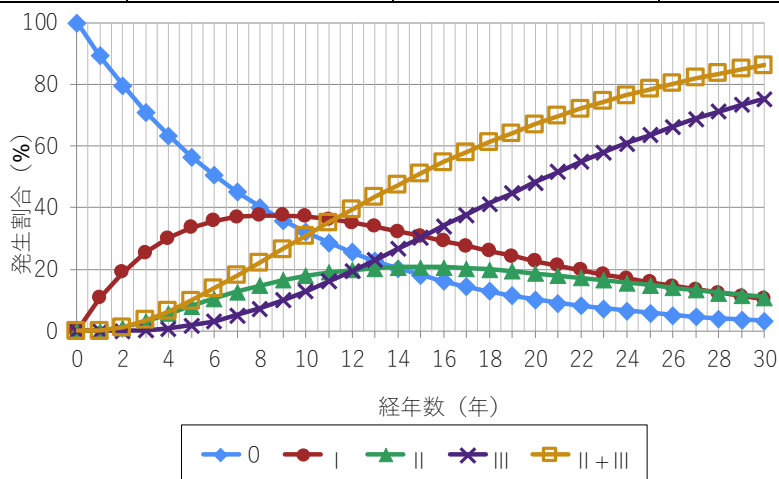


図 4.4-1 外装仕上塗材のひび割れの予測（全体）

表 4.4-2 遷移確率（南面）

	$x_0$	$x_1$	$x_2$
最大値	0.473	0.504	0.500
最小値	0.012	0.003	0.047
平均値	0.125	0.147	0.319

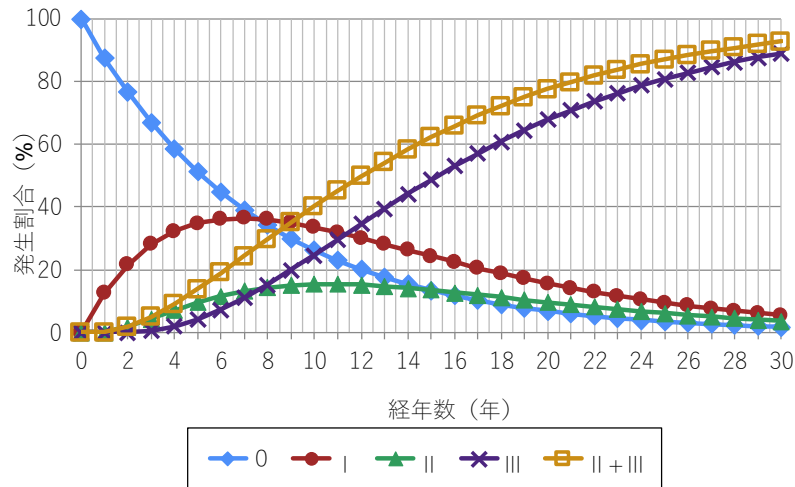


図 4.4-2 外装仕上塗材のひび割れの予測（南面）

表 4.4-3 遷移確率（北面）

	$x_0$	$x_1$	$x_2$
最大値	0.454	0.484	0.450
最小値	0.015	0.007	0.004
平均値	0.112	0.074	0.096

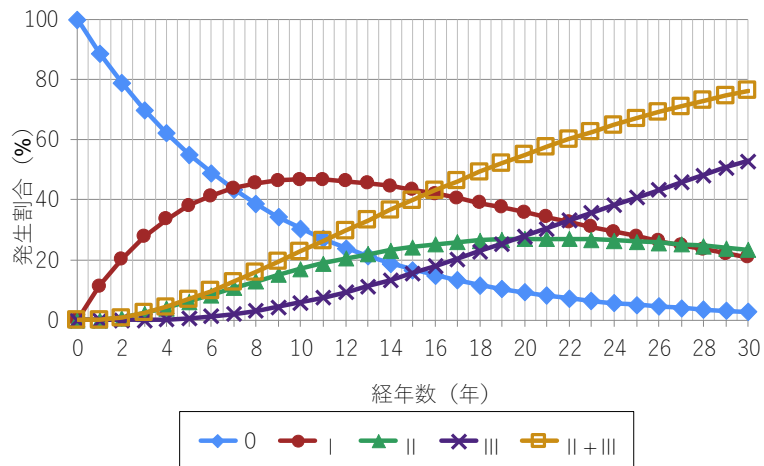


図 4.4-3 外装仕上塗材のひび割れの予測（北面）

表 4.4-4 遷移確率（雨掛かり有り）

	$x_0$	$x_1$	$x_2$
最大値	0.473	0.504	0.475
最小値	0.016	0.016	0.004
平均値	0.143	0.159	0.238

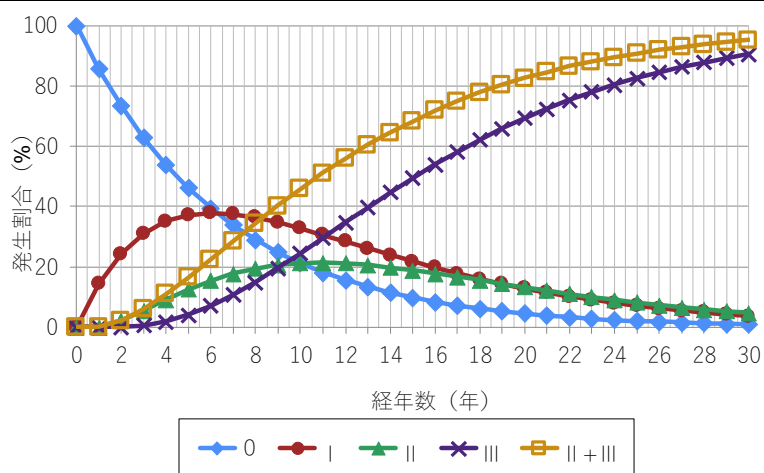


図 4.4-4 外装仕上塗材のひび割れ予測（雨掛かり有り）

表 4.4-5 遷移確率（雨掛かり無し）

	$x_0$	$x_1$	$x_2$
最大値	0.384	0.396	0.250
最小値	0.015	0.005	0.036
平均値	0.109	0.089	0.159

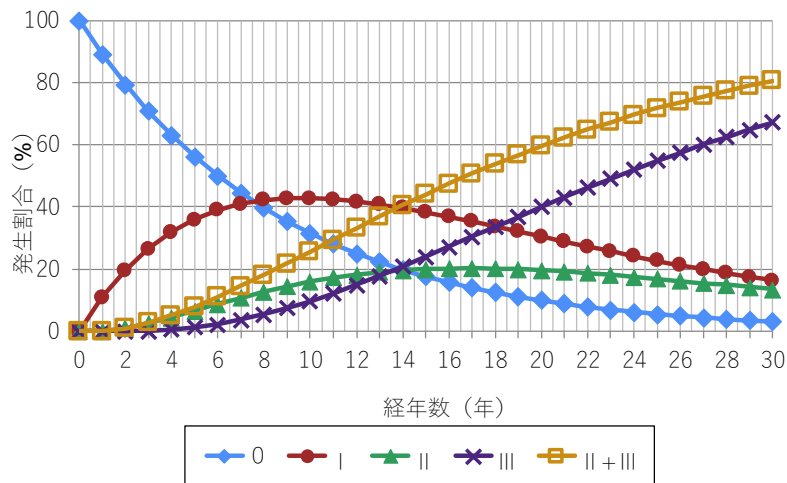


図 4.4-5 外装仕上塗材のひび割れ予測（雨掛かり無し）



#### 4.5 まとめ

本章では、3章で調査を実施した同一環境に建てられている4棟の建築物の外壁に施された外装仕上塗材の劣化の状態から、予測可能な劣化の種類として表層ひび割れを選定した。

また、確率論モデルであるマルコフ連鎖モデルを用いて、外装仕上塗材の表層ひび割れについての進行予測を行った。本研究より得られた知見を以下に示す。

- (1) 光沢度保持率については、改修からの経年数が10年までは経年と共に劣化が進行することが確認されたが、それ以降は劣化の進行が確認されなかった。
- (2) 変退色については、北面では経年と共に劣化の進行が確認されたが、南面については経年と劣化の間に関係性が確認できなかった。
- (3) 白亜化については、経年と劣化の進行の間に関係性が確認できなかった。
- (4) 表層ひび割れについては、南面、北面共に改修からの経年と劣化の進行の間に関係性が確認できた。また、経年が進むごとに劣化が単純に増加する傾向があることが確認された。
- (5) 確率論の一つであるマルコフ連鎖モデルには不可逆という特徴があり、同様に不可逆の傾向を示した表層ひび割れの予測を行う手法として適していると考えられた。
- (6) 実建築物の調査結果に確率論モデルであるマルコフ連鎖モデルを適用することにより、外装仕上塗材の表層ひび割れの進行予測を行った。

【第3章における参考文献】

- 1) Yan Zhang, Brani Vidakovic, Uncertainty Analysis in Using Markov Chain Model to Predict Roof Life Cycle Performance, 10DBMC International Conference On Durability of Building Materials and Components LYON [France] 17-20 April 2005
- 2) 小牟禮, 健一他: 塩害をうける栈橋上部工のマルコフ連鎖モデルを用いた劣化予測に基づく LCC 算定に関する考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No1, 2004
- 3) D. M. ABRAHAM, R. WIRAHADIKUSUMAH, DEVELOPMENT OF PREDICTION MODELS FOR SEWER DETERIORATION - Prediction Models for Sewer Deterioration, Durability of Building Materials and Components 8. (1999) Edited by M.A. Lacasse and D.J. Vanier. Institute for Research in Construction, Ottawa ON, K1A 0R6, Canada, pp. 1257-1267.
- 4) HW Kaempfer, M Berndt, G Voigtlaender, Estimation Of Residual Service Life For Existing Sewerage Systems, 9DBMC: 9th International Conference : Durability of Building Materials and Components, Paper 164 Page 6, CSIRO Australia, 2002
- 5) George Morcous, Performance Prediction of Bridge Deck Systems Using Markov Chains, Journal of Performanc of Constructed Facilities 20(2), May 2006

## 第5章 ひび割れと表層透気性の関係性についての検討

### 5.0 abstract

In the previous chapter, the prediction method of the surface crack of the exterior finish coating material is shown, but it is expected that the progress of neutralization becomes easier as carbon dioxide flows more easily due to cracks. Therefore, in this chapter, we will examine the relationship between cracks and surface permeability. First, we confirmed the relationship between the crack of the overcoating material of the exterior finish and the surface permeability of the top coat at the laboratory level. Next, we confirmed the relationship between surface cracks and surface permeability of exterior finish materials applied to actual buildings. The findings obtained in this chapter are shown below.

(1) As a verification in the laboratory, we painted the paint on the specimen and created a pseudo-crack. As a result of measuring air permeability, it was confirmed that the air permeability increases as pseudo-crack increases.

(2) As a result of investigating the outer wall of the real building on which the multilayer finish coating material was applied, it was confirmed that there is a relationship between the surface layer crack and the surface layer air permeability.

(3) Based on the experiments and survey results, it was shown that there was a possibility of being related to the surface permeability of the outer wall on which the exterior finish was applied.

### 5.1 はじめに

前章では外装仕上塗材の表層ひび割れの予測手法を提案したが、外装仕上塗材の表層ひび割れが躯体コンクリートに対する保護性能に与える影響として、ひび割れにより二酸化炭素が流入しやすくなることにより中性化の進行が容易になることが予想される。そこで、本章においてはひび割れと表層透気性の関係性について検討を行う。検討のためのプロセスを図5.1-1に示す。

なお、コンクリートのひび割れ幅と中性化の関係性の報告[1]に見られるように中性化の進行は3次元で進行するため、図3.2-8のようなひび割れの本数(密度)の評価だけではなく、本来であればひび割れ幅についても評価する必要があるが、外装仕上塗材に発生するひび割れはヘアクラックのような微細な幅のものが多く、コンクリートのひび割れに比べて幅が小さい傾向にあるため、本稿では本数(密度)のみを用いてひび割れの評価を行うこととした。

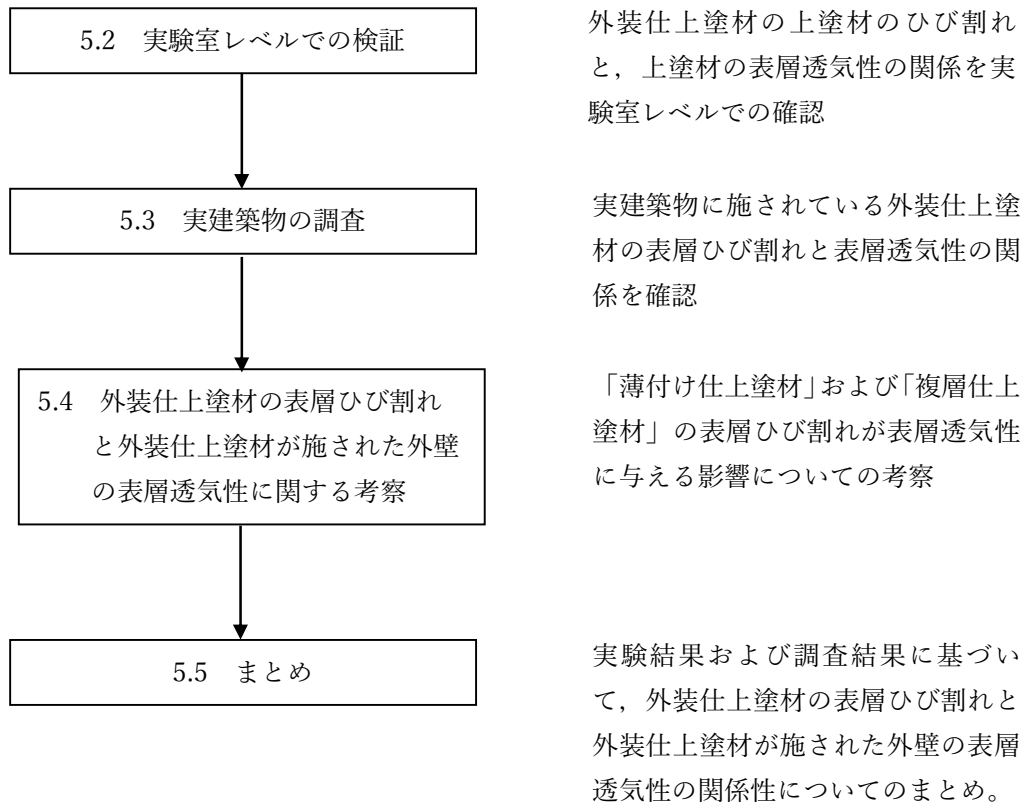


図 5.1-1 第 4 章フローチャート

## 5.2 実験室レベルでの検証

### 5.2.1 実験の目的

鉄筋コンクリート造建築物に用いられる複層仕上塗材は、日射や降雨から躯体を保護する性能に優れた上塗層、テクスチャーを付与する主材層、躯体との密着を向上させる下塗層で構成されることが多い。ここでは上塗材のひび割れにより、躯体ないし主材層の保護効果が低下する可能性について、上塗層に擬似的に発生させたひび割れによる表層透気性の変化を実験室レベルで測定することにより確認を行った。

### 5.2.2 実験の概要

試験体は図 5.2-1 に示すようにミシン糸を異なる間隔 (30, 20, 15, 10, 7 および 5mm) 並びに中央に 1 本伏せこんだ 6mm 厚のケイカル板に対し、外装仕上塗材の上塗層として使用されるアクリル樹脂系エマルジョン塗料を製造所が指定する所要量をローラーで塗付けたものとし、60 分後にミシン糸を引き抜いて擬似ひび割れを再現した。また、ひび割れの発生していない状況を再現するため、ミシン糸を伏せこまないケイカル板についてもアクリル樹脂系エマルジョン塗料を塗付けた。

ミシン糸伏せこみ前の試験体および塗料塗付後 24 時間経過した試験体 (ミシン糸は引き抜き済み) の表層透気性を評価した。

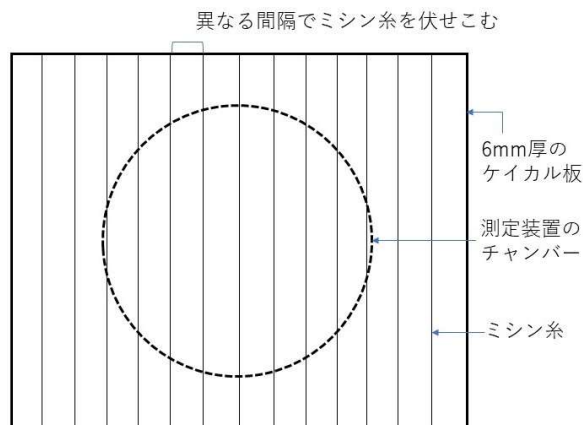


図 5.2-1 試験体の概要

### 5.2.3 表層透気性試験の概要

表層透気性は、R.Torrent[3]によって開発された手法で評価する。本手法は図 5.2-2 に示す通り、内部と外部のチャンバーの気圧を等しく制御し、外部から内部チャンバーへの空気の流入を物理的に排除し、内部チャンバー下に形成される栓流によるチャンバー内の経過時間と気圧変化量 ( $\Delta P$ ) から、物体の透気係数  $Kt[m^2]$  を求めるものである (式 5.2-1)。

$$Kt = \left(\frac{Vc}{A}\right)^2 \frac{\mu}{2\varepsilon Pa} \left[ \frac{\log\left(\frac{Pa+\Delta P}{Pa-\Delta P}\right)}{\sqrt{tf}-\sqrt{t0}} \right]^2 \quad (\text{式 5.2-1})$$

ここに、

Kt: 透気係数[m<sup>2</sup>]

Vc: 内側チャンバーの体積[m<sup>3</sup>], A: 内側チャンバーの断面積[m<sup>2</sup>]

Pa: 大気圧[N/m<sup>2</sup>], Pf: 測定終了時の圧力[N/m<sup>2</sup>]

tf: 測定終了時間[s], t0: 測定開始時間=60[s]

ε: 空隙率=0.15, μ: 空気の粘性[N・s/m<sup>2</sup>]

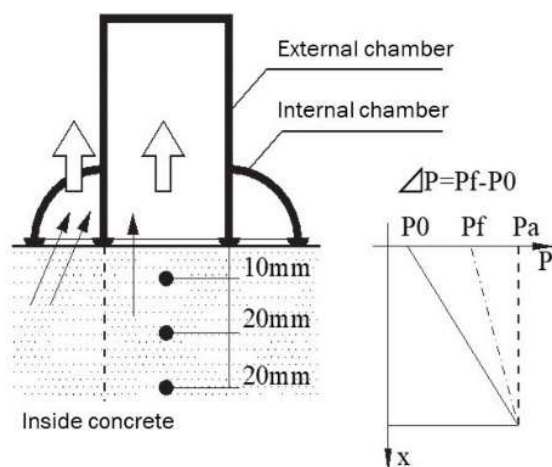


図 5.2-2 表層透気性試験の概要

#### 5.2.4 試験用基板の選定

本実験では上塗材自体の透気性を擬似ひび割れを加味して測定することを目的としているが、上塗材は「薄膜である」、「下地と密着する」という要素から、塗膜だけを抽出して透気性を測定することは困難である。そのため、何らかの基板の上に塗付け、上塗材と基板の組み合わせに対して透気性を測定することとなるが、上塗材自体の透気性を観測するという観点から、基板の影響は可能な限り小さく、つまり基板の透気性は大きいことが好ましい。また、擬似ひび割れを増やしていくと透気性が増加し、最終的には基板の透気性と同等になると予想されるが、基板の透気性が測定できないほど大きい場合、擬似ひび割れが比較的少ない段階で測定不能になる恐れがある。そこで、基板の選定については、透気性が測定可能であり、なおかつ、透気性が大きい材料とすることが望ましい。

そこで、表 5.2-1 に基材の選定候補とした材料の一覧を、表 5.2-2 に透気試験の測定結果を示す。

試験用基板としては透気性が測定可能であった材料のうち、もっとも透気係数が大きい値となった「製品名 C (ケイ酸カルシウム板)」を採用することとした。

表 5.2-1 試験用基板の候補一覧

製品名	一般名	かさ密度 (g/cm <sup>3</sup> )	曲げ強さ (N/mm <sup>2</sup> )	曲げヤング率 (N/mm <sup>2</sup> )
A	繊維混入石膏ボード	1.60	15.0	13×10 <sup>3</sup>
B	ケイ酸カルシウム板	1.05	13.0	9×10 <sup>3</sup>
C	ケイ酸カルシウム板	0.75	10.0	6×10 <sup>3</sup>
D	フレキシブルボード	1.60	28.0	16×10 <sup>3</sup>
E	フレキシブルボード	1.60	28.0	16×10 <sup>3</sup>

表 5.2-2 透気試験結果

製品名	一般名	透気係数 10 <sup>-16</sup> m <sup>2</sup>
A	繊維混入石膏ボード	測定不可
B	ケイ酸カルシウム板	0.435
C	ケイ酸カルシウム板	1.200
D	フレキシブルボード	0.135
E	フレキシブルボード	0.533

### 5.2.5 実験結果

ミシン糸伏せこみ前の試験体の透気係数 (①) および塗料塗付後 24 時間経過した試験体 (ミシン糸は引き抜き済み) の透気係数 (②) の比 (②÷①) を表 5.2-3 および図 5.2-3 に示す。ここで、「擬似ひび割れの長さ」は測定装置のチャンバーの範囲にある擬似ひび割れの長さの合計を表している。なお、擬似ひび割れが 0mm の試験体 (ミシン糸を伏せこまなかった時) は圧力変化がほとんどなく透気係数が測定下限値以下であったため、図 5.2-3 の透気係数比率では 0 として扱っている。

表 5.2-3 および図 5.2-3 より、擬似ひび割れの長さが増えると透気係数が増加し、最終的には塗料塗り付け前のケイカル板自体の透気係数に近づくことが確認できる。このことは、上塗層のひび割れが増加すると気体の透過が容易になり、すなわち中性化抑制効果が減少し、最終的には上塗層が施工されていない状態に近づいていく可能性を示しているといえる。

表 5.2-3 擬似ひび割れと表層透気性の関係

擬似ひび割れの長さ (mm)	マシン伏せこみ前の透気係数 ( $10^{-16} \text{ m}^2$ ) (①)	上塗材塗付後 24 時間経過時の透気係数 ( $10^{-16} \text{ m}^2$ ) (②)	比率 (②÷①)
0	2.1	-	-
100	2.1	1.3	0.62
260	2.1	1.0	0.48
403	2.1	1.5	0.71
538	1.7	1.4	0.82
759	1.7	1.4	0.82
1128	1.8	1.8	1.00
1552	1.8	2.0	1.11

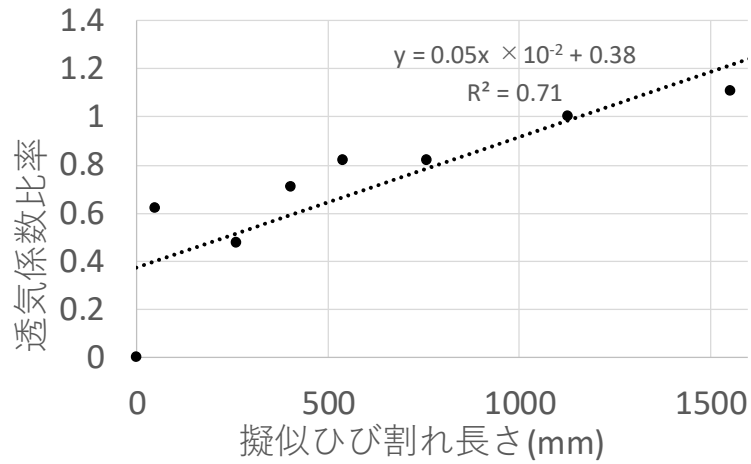


図 5.2-3 擬似ひび割れと表層透気性の関係



### 5.3 実建築物の調査

#### 5.3.1 調査の目的

「5.2 実験室レベルでの検証」では、上塗層のひび割れと表層透気性との関係について確認を行ったが、本節では実建築物を対象として、複層仕上塗材の表層ひび割れと複層仕上塗材が施された外壁の表層透気性の調査を実施した。

#### 5.3.2 調査対象の概要

表 5.3-1 に示す 9 棟の鉄筋コンクリート造の団地について、調査箇所を地上からの高さ約 1.5m とし、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。本建物の特徴として、それぞれの団地がほぼ同一環境条件下にあり、築年数の違いが仕上げ材の経年の違いとなる。

表 5.3-1 調査対象の概要

名称	築年数 (年)	外装仕上塗材
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

#### 5.3.3 調査結果

図 5.3-1 にひび割れグレードと透気係数の経年変化を示す。年数の経過に伴い、ひび割れグレードと透気係数のそれぞれが増加している傾向が認められる。これにより、複層仕上塗材の表層ひび割れと複層仕上塗材が施された外壁の表層透気性との間には一応の相関がある可能性が示された。

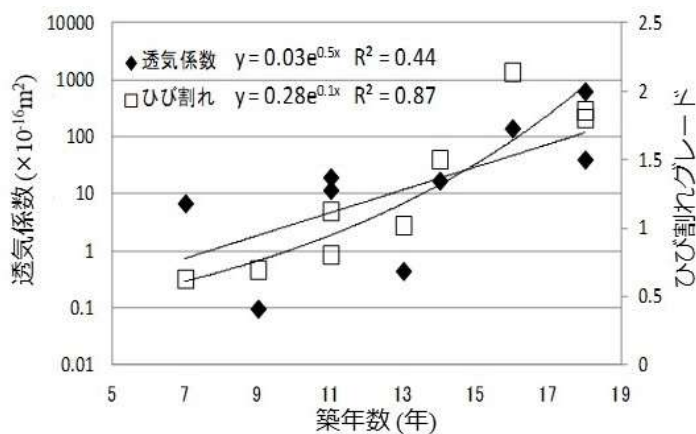


図 5.3-1 経年による表層ひび割れと透気係数の推移

#### 5.4 外装仕上塗材の表層ひび割れと外装仕上塗材が施された外壁の表層透気性に関する考察

外装仕上塗材には大別して、「薄付け仕上塗材」、「厚付け仕上塗材」および「複層仕上塗材」の3種類が存在する。ここでは、比較的生産量[1]が多い「薄付け仕上塗材」および「複層仕上塗材」について考察する。

本章においては、外装仕上塗材の表層ひび割れと外装仕上塗材が施された外壁の表層透気性の関係について検討を行っているが、「薄付け仕上塗材」と「複層仕上塗材」とでは表層ひび割れが透気性に与える意味合いが異なってくる可能性が考えられる。

「薄付け仕上塗材」は図 5.4-1 に示すように躯体コンクリートの上に比較的薄い層を1層設ける仕上であるが、この仕上に表層ひび割れが発生した場合は塗膜が薄く1層の仕上であるため、「4.2 実験室レベルでの検証」で実験を行った上塗材のひび割れと似たような透気性の増加が予想される。



図 5.4-1 薄付け仕上塗材の断面イメージ

一方、「複層仕上塗材」は図 5.4-2 に示すような躯体コンクリートへの密着性を担う「下塗材」層、模様（テクスチャー）を担う「主材」層、色の付与、防水性、対候性を担う「上塗材」層の3層構造となっている。

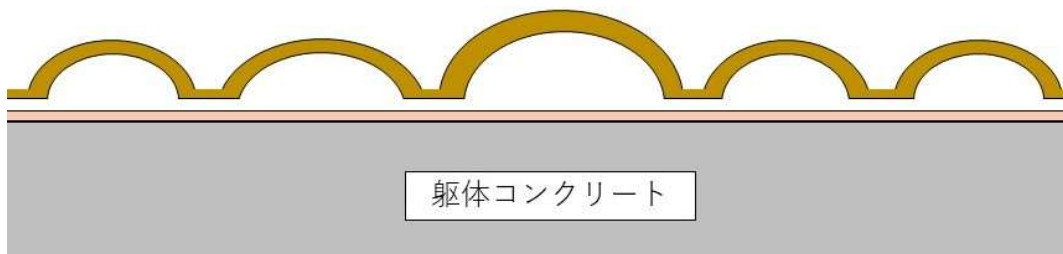


図 5.4-2 複層仕上塗材の断面イメージ

複層仕上塗材の表層ひび割れは主に上塗材層に発生するものであり、主材層まで貫通す

るひび割れは少ないと予想される。複層仕上塗材は主材層が厚く、上塗層は薄い材料となっており、仕上塗材全体の躯体保護性能を考える上で主材層の影響も重要な要素となる。しかし、仕上塗材の中酸化抵抗は樹脂量に対する平均塗膜厚さと相関が見られるとの報告[6]もあり、外装仕上塗材の緻密性の大半は樹脂分の豊富な上塗層が担っており、上塗層に比べて体質顔料が多く、樹脂分の少ない（炭酸カルシウム成分の多い）主材層の寄与は少ないとも考えられる。また、通常主材層はテクスチャーとして凹凸があり、凹部の厚さは平均塗厚さの0～60%との報告[7]もある。さらに上塗層がひび割れることにより、主材層の劣化が進行し、外装仕上塗材全体の中酸化抑制効果が減少したものとする。一方、仕上塗材は紫外線により樹脂が損傷し空隙が増加するが、上塗層のひび割れも紫外線による樹脂の硬化が大きな要因であり、上塗層のひび割れが激しい建物は紫外線に多く晒されている環境である可能性が考えられる。そのような背景のもと、経年と共に仕上塗材が施された外壁の透気係数が増加するという報告[8]があることや、図 5.3-1 に見られるように経年と共にひび割れグレードと透気係数のそれぞれが増加している傾向が見られたため、本研究では実建築物の調査結果を基に仕上塗材表層のひび割れと透気性の関係についての検討を行うこととした。主材層が仕上塗材全体の透気性に及ぼす影響については今後の課題として検討を進めていきたい。

## 5.5 まとめ

本章では、鉄筋コンクリート造建築物の外壁に施された外装仕上塗材について、表層のひび割れと躯体コンクリートに対する中性化抑制効果の減少に関して、実験室レベルでの検証、および、実建築物の調査の結果を確認しながら考察した。得られた知見を以下に示す。

(1) 実験室レベルの検証として、複層仕上塗材の上塗材単体を試験体に塗付け、擬似ひび割れを作成して透気性を測定した結果、擬似ひび割れが増加するほど透気性が増加する傾向が確認された。

(2) 複層仕上塗材が施工された実建築物の外壁について、同位置の表層ひび割れと表層透気性を調査したところ、関係性があることが確認された。

(3) 薄膜で1層である薄付け仕上塗材だけでなく、3層で構成される複層仕上塗材についても表層のひび割れが表層透気性に影響を与える可能性について考察した。

(4) 上記実験および調査結果により、薄付け仕上塗材や複層仕上塗材の違いに関わらず、外装仕上塗材の表層ひび割れが、外装仕上塗材が施された外壁の表層透気性と関係性がある可能性が示された。主材層が仕上塗材全体の透気性に及ぼす影響については今後の課題として検討を進めていきたい。

【第5章における参考文献】

- 1) 伊代田岳史, 矢島哲司, 魚本健人: コンクリートのひび割れが中性化速度に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.20(2), 979-984, 1998.6.30
- 2) 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, pp.1539-1545, 2013.9
- 3) Torrent R.: A two-chamber vacuum cell for measuring the coefficient of permeability to air of the concrete cover on site, Mater. & Struct., Vol.25, No.150, pp.358-365, 1992.7
- 4) 長谷川拓哉, 千歩修, 馬場明生, 渡部嗣道: モデル建築の 11 年屋外暴露試験結果に基づく表面仕上塗材の鉄筋腐食効果に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 560 号, pp.27-33, 2002.10
- 5) 長谷川拓哉, 千歩修, 福山智子, 井上照郷: モデル建物の 20 年屋外暴露試験に基づく仕上塗材の劣化状況・中性化および鉄筋腐食抑制効果, 日本建築学会構造系論文集, 第 82 巻, 第 733 号, pp.337-346, 2017.3
- 6) 河野正典, 榎田佳寛, 落合亮太, 唐沢智之: 仕上塗材の経年劣化を考慮した中性化抑制効果に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, Vol.69, No.584, pp.15-21, 2004. 10
- 7) 河野正典, 榎田佳寛: 仕上塗材の経年劣化を考慮した中性化抑制効果評価手法の暴露データによる検証, 日本建築学会構造系論文集, Vol.71, No.609, pp.9-14, 2006. 11
- 8) 唐沢智之, 榎田佳寛: 既存建物の仕上塗材の透気係数と中性化深さの調査に基づく仕上塗材の中性化抑制効果, 日本建築学会構造系論文集, Vol.76, No.661, pp.449-454, 2011. 3

## 第 6 章 外装仕上塗材の表層ひび割れと中性化抑制効果の関係についての検討

### 6.0 abstract

In chapter 3, we predicted the surface cracks of the exterior finish using a Markov chain model. Next, in chapter 4, we confirmed the relationship between the surface crack of the exterior finish coating material and the surface permeability of the outer wall provided with the exterior finish coating material. Other hand, previous studies on the relationship between the surface permeability of the outer wall and the neutralization rate coefficient have been reported. In this chapter, based on these findings, we will examine the relationship between the surface cracks of the exterior finish coating material and the neutralization inhibiting effect of the exterior finish coating material.

First, we propose the cumulative crack grade accumulation of the surface cracked grade of the exterior finish over the years, using the prediction equation of deterioration obtained in Chapter 3. By checking the relationship between the cumulative crack grade and the neutralization depth of buildings built in the same environment surveyed in Chapter 3, we found the relationship that the surface cracks of the exterior finish and the effect of suppressing neutralization. Other hand, we confirm the relationship between cumulative crack grade and surface neutralization depth of surface cracks of exterior finish for buildings built in different environments. The findings obtained in this chapter are shown below.

- (1) We set a “cumulative cracking grade” that represents the stacking of cracks in exterior finish. We confirmed the relationship between cumulative crack grade and neutralization depth of buildings in the same environment.
- (2) We confirmed the relationship between the neutralization depth and the cumulative cracking grade of buildings in different environments. But the correlation was small compared to the building built in the same environment.
- (3) Based on the above findings, we considered that there was a possibility of qualitative relationship between the cracking of the exterior finish coating material and the neutralization inhibiting effect.

### 6.1 はじめに

コンクリートの中性化について多くの研究[1~6]が報告されているが、図-3.2.3-19 に示されるように建築物の経年と中性化深さの間に関係性が見いだせないパターンも発生する。これは環境等による劣化要因の変化も考えられるが、外装仕上塗材の劣化が中性化抑制効果の減少につながることから、経年による外装仕上塗材の劣化や改修による外装仕上塗材の健全化等により、改修時期や改修回数の違いが躯体コンクリートの中性化進行に大きく影響している可能性が考えられる。

第 5 章では外装仕上塗材の表層ひび割れと外装仕上塗材が施されている外壁の表層透気性との関係性について検討を行ったが、既往の研究として田中らにより既存 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認められること示されている[7]。

本章では、第 4 章で得られた知見であるマルコフ連鎖モデルを用いた外装仕上塗材の表層ひび割れの予測、第 5 章で得られた外装仕上塗材の表層ひび割れと外装仕上塗材が施された外壁の表層透気性との関係性の知見、および、既往の研究として報告されている外壁の表層透気性と中性化速度係数の関係性に関する知見を足掛かりとして、外装仕上塗材の表層ひび割れと外装仕上塗材の中性化抑制効果の関係について検討を行う。第 6 章のフローチャートを図 6.1-1 に示す。

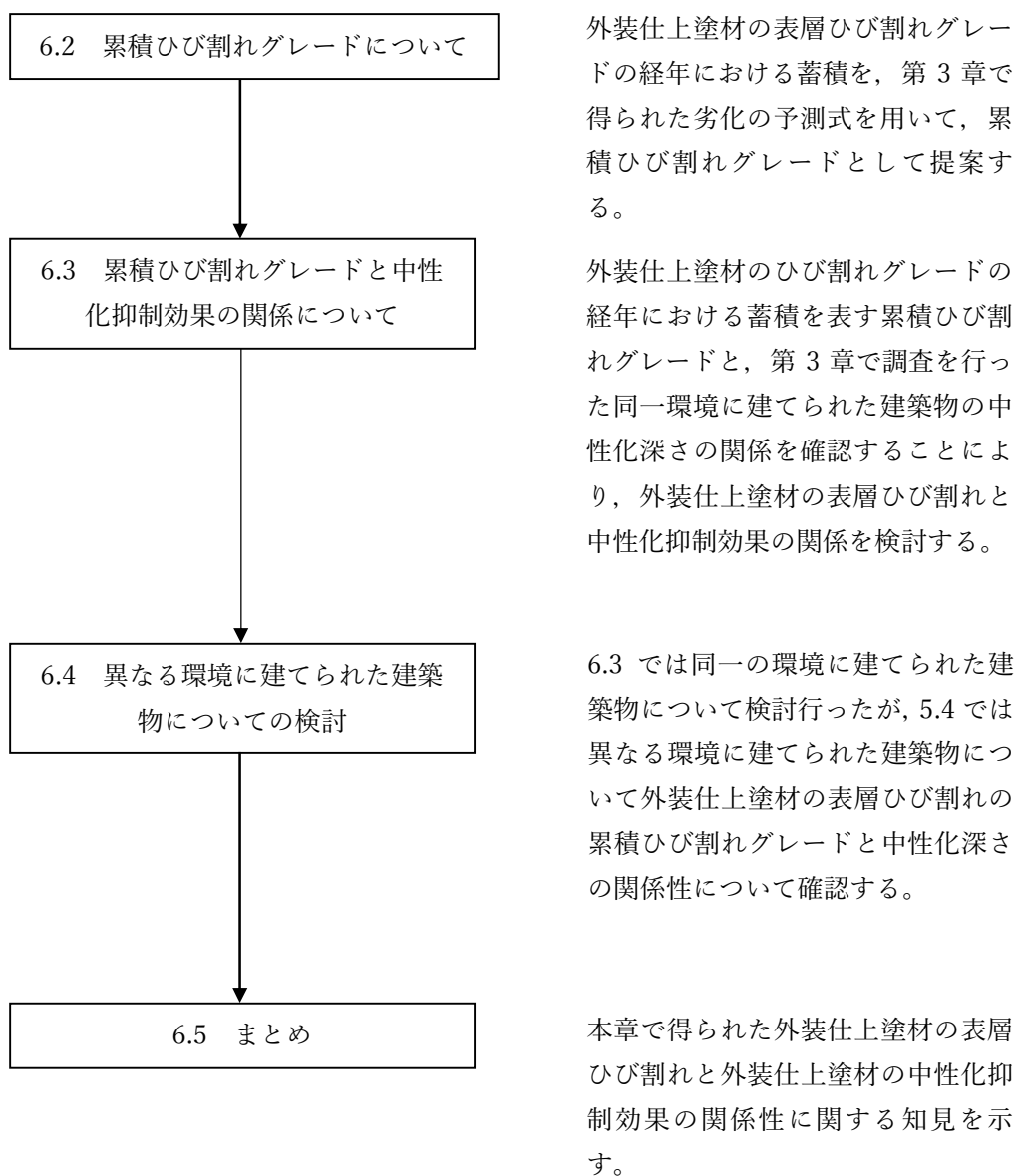


図 6.1-1 第 6 章のフローチャート

## 6.2 累積ひび割れグレードについて

コンクリートの中性化について多くの研究が報告されているが[1~6], 第3章にて調査した建築物(図3.2-19)のように建築物の経年と中性化深さの間に関係性が見いだせないパターンも発生しうる。これは外装仕上塗材の劣化が中性化抑制効果の減少に繋がることから, 経年による外装仕上塗材の劣化や, 改修による外装仕上塗材の健全化が中性化進行に大きく影響している可能性が考えられる。

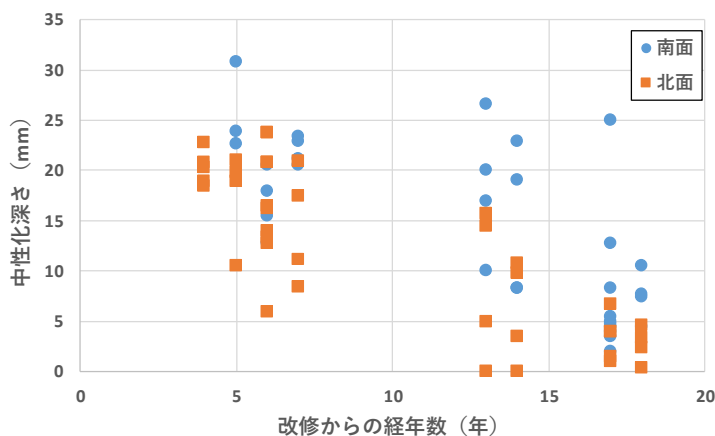


図 3.2-19 (再掲) 中性化深さ (方位毎)

ここで, 第3章にて調査した建築物におけるマルコフ連鎖モデルにおける表層ひび割れの予測結果(図4.4-1)から, 式6.2-1を用いて経年数と平均ひび割れグレードの関係を求める。その結果を図6.2-1に示す。

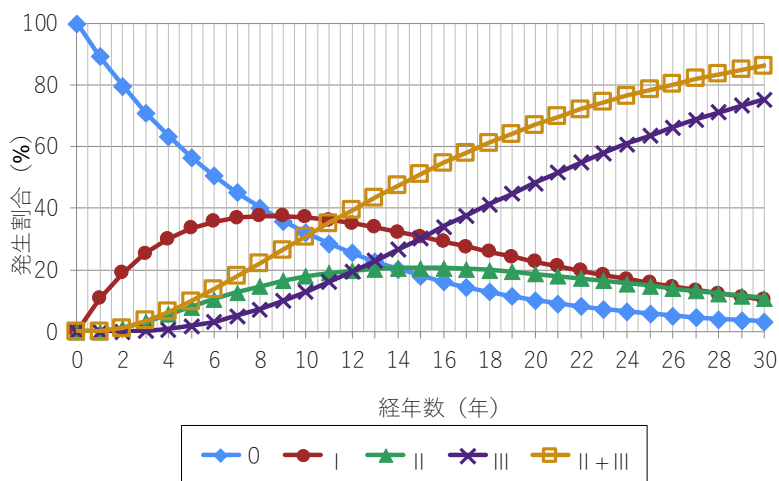


図 4.4-1 (再掲) 外装仕上塗材のひび割れの予測 (全体)



$$\begin{aligned}
& \text{平均ひび割れグレード} = \text{ひび割れグレード(0)の割合} \times 0 \\
& \quad + \text{ひび割れグレード(I)の割合} \times 1 \\
& \quad + \text{ひび割れグレード(II)の割合} \times 2 \\
& \quad + \text{ひび割れグレード(III)の割合} \times 3 \quad \dots \text{式(6.2-1)}
\end{aligned}$$

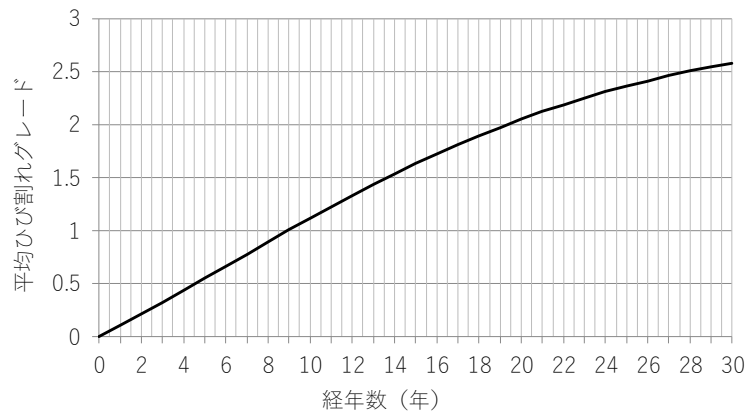


図 6.2-1 平均ひび割れグレードの推移の予測

ここで、図 3.2-17 および図 3.2-18 において塗材のひび割れが経年とともに進行していること、図 3.2-19 および図 3.2-20 において新築から改修までの年数が長くなるほど中性化が進行している傾向にあることを踏まえ、式 6.2-2 に示すように、新築（または塗替え時）からの経年数と各経年におけるひび割れグレードの平均を考慮した累積ひび割れグレードを設定し、中性化深さとの関係の考察を行うこととする。累積ひび割れグレードの概念図を図 6.2-2 に示す。

$$D_a = \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^{T(n)} (d_n(t)) \quad \dots \text{(式 6.2 - 2)}$$

ここで、 $D_a$  は累積ひび割れグレード、 $N$  は外装仕上塗材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)、 $d_n(x)$  は  $n$  回目の塗装の経年数  $x$  時の平均ひび割れグレードを表す。

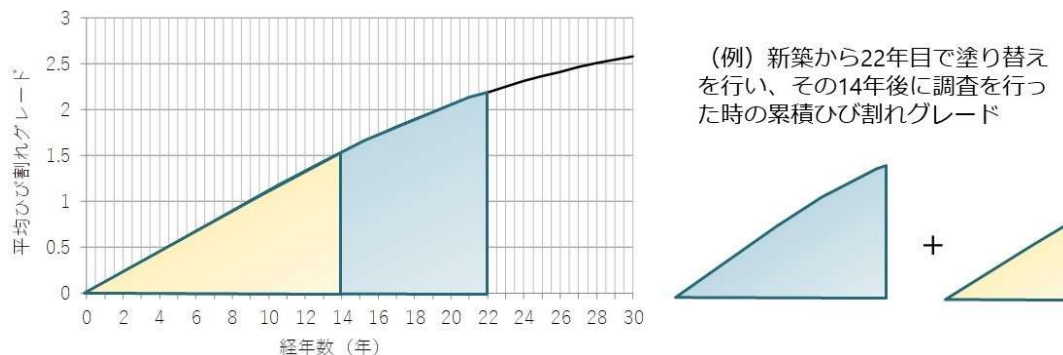


図 6.2-2 累積ひび割れグレードの概要

### 6.3 中性化深さと累積ひび割れグレードの関係性について

第3章で調査を実施した表 3.2-1 の調査対象に対して、各建築物の累積ひび割れグレードと中性化深さの平均との関係を図 6.3-1 に示す。表 3.2-1 に示す建物の一つの特徴は、基材となるコンクリートがほぼ同様の材齢かつ品質であり、公的機関によって仕上塗材の種類・品質がほぼ同一に管理されており、またひび割れと中性化の測定がほぼ同位置で行われていることから、実環境下における仕上塗材の劣化と中性化の進行を検討する上では好適と考えた。図 6.3-1 より、累積ひび割れグレード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、ひび割れと中性化抑制効果の間に一定の関係性がある可能性を示していると考ええる。

表 3.2-1 (再掲) 調査対象

	調査対象建築物			
	A	B	C	D
構造	鉄筋コンクリート造建築物			
設計基準強度	18 N/mm <sup>2</sup>	18 N/mm <sup>2</sup>	21 N/mm <sup>2</sup>	21 N/mm <sup>2</sup>
建築年度	1978 年	1977 年	1977 年	1977 年
改修年度	2010 年	2008 年	2001 年	1997 年
改修からの年数	6 年	8 年	15 年	19 年
外装仕上塗材の種類 (新築時)	複層仕上塗材 E			
外装仕上塗材の種類 (改修時)	合成樹脂エマルジョンペイント			
外装仕上塗材の色	白			

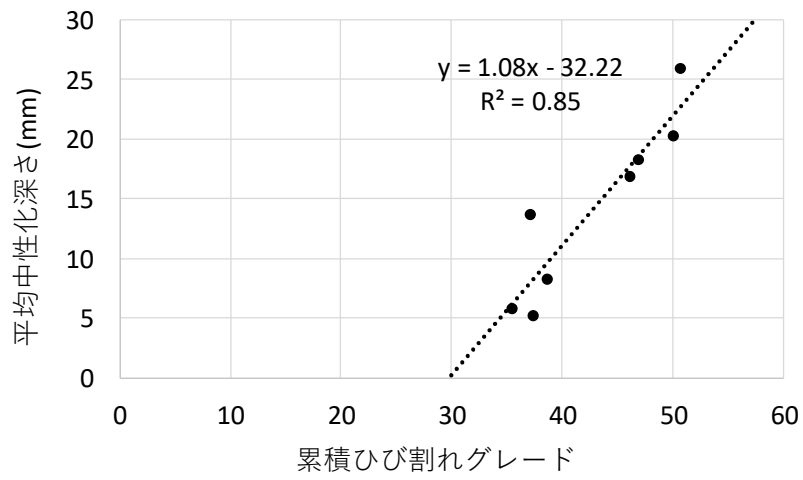


図 6.3-1 累積ひび割れグレードと中性化深さの関係

## 6.4 異なる環境に建てられた建築物についての検討

### 6.4.1 調査対象および調査方法

前節「6.3 中性化深さと累積ひび割れグレードの関係性について」においては、同様の環境下の4棟の建築物について検討を行ったが、他の諸元および環境条件の異なる建築物について検討を加える。ただしコンクリート自体の中性化に及ぼす影響を考慮し、ここでは設計基準強度はほぼ近いものを選定した。すなわち、表6.4-1の調査対象（物件名A～Dは表3.2-1の建築物）について、「3.2.3 調査方法」で示した方法により「④ひび割れ」「⑤中性化深さ」を調査した。

表 6.4-1 調査対象

	新築年度 (西暦)	改修年度1 (西暦)	改修年度2 (西暦)	調査年度 (西暦)	設計基準 強度 (N/mm <sup>2</sup> )	階数	地域
A	1978	2010		2012 ~ 2016	18	4	茨城
B	1979	2008			18	4	茨城
C	1979	2001			21	6	茨城
D	1979	1997			21	10	茨城
E	1967	1993		2015	18	2	兵庫
F	1962	1992		2015	18	2	茨城
G	1967	1992		2016	18	2	滋賀
H	1964	1981		2013	18	5	東京
I	1977	1995	2013	2016	21	15	埼玉
J	1978	2010		2016	24	14	東京
K	1977	2010		2015	24	14	東京
L	1988			2015	不明	6	東京
鉄筋コンクリート造建築物，樹脂系複層仕上塗材（白色）							

## 6.4.2 調査結果

### ① 表層ひび割れ

調査対象の調査時における外装仕上塗材の経年数とひび割れグレードの平均を図 6.4-1 に示す。仕上塗材改修後の経年数が増えるほど、建物諸元および環境条件に関わらず仕上塗材のひび割れが増加し、およそ改修後 20 年で多くはグレード 3 に達していることが確認できる。全体として経年数が増加するほど表層ひび割れが進行しており、不可逆性を示しており、マルコフ連鎖モデルの適用に問題はないものであると考えられる。ただし、調査物件 G および L については経年に対してひび割れの進行が遅い。特に L については東京の物件であり、地域的な日射量や降雨量等について物件 H, J および K と大きく異なるとは考えづらいため、外装仕上塗材の上塗材の樹脂の種類の違い等が予想されたが、設計図書等に明確な記載が無く確認することは出来なかった。

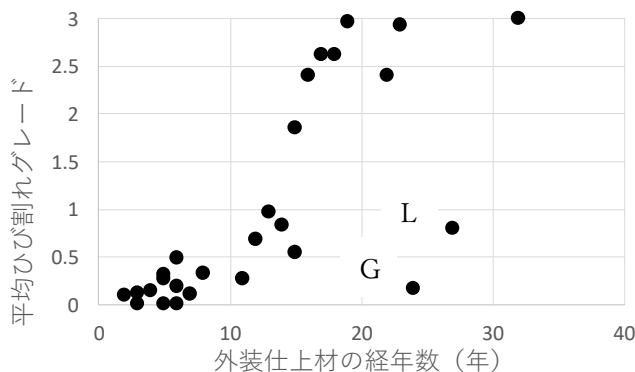


図 6.4-1 ひび割れグレードの平均

## ② 中性化深さ

調査対象の築年数と中性化深さの測定の結果を図 6.4-2 に示す。築年数と中性化深さの間に関係性が見られなかった。これは調査対象が建てられている環境の違いにより日射量や降雨量等の環境外力が異なっていることや、外装仕上塗材の改修時期や回数が異なっていること、外装仕上塗材の施工精度や管理方法が異なっていることにより、外装仕上塗材の劣化の状況が異なり、外装仕上塗材の中性化抑制効果に違いがあるためであると考えられる。

図 6.4-3 に設計強度別の中性化深さの平均を示す。設計強度と中性化深さの間には明確な関係が確認できなかった。これは設計基準強度  $18\text{N/mm}^2\sim 24\text{N/mm}^2$  の範囲においては躯体コンクリートの強度よりも建築物が置かれた環境における外装仕上塗材に対する劣化外力の違いの方が躯体コンクリートの中性化に与える影響が大きい可能性を示しているが、今後はサンプル数を増やすことで検討を行っていきたい。

図 6.4-4 に地域別の中性化深さの平均を示す。地域による経年数と中性化深さの関係の違いを確認することは出来なかった。これは今回の調査物件は関東圏が大半を占めているためであると考えられる。今後調査物件を増やすことが課題となっている。

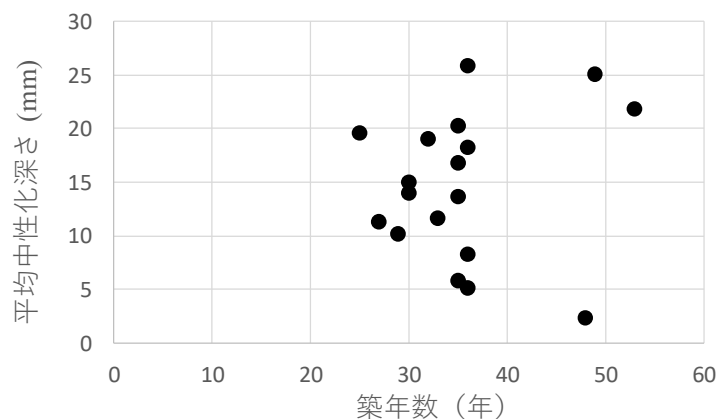


図 6.4-2 中性化深さの平均

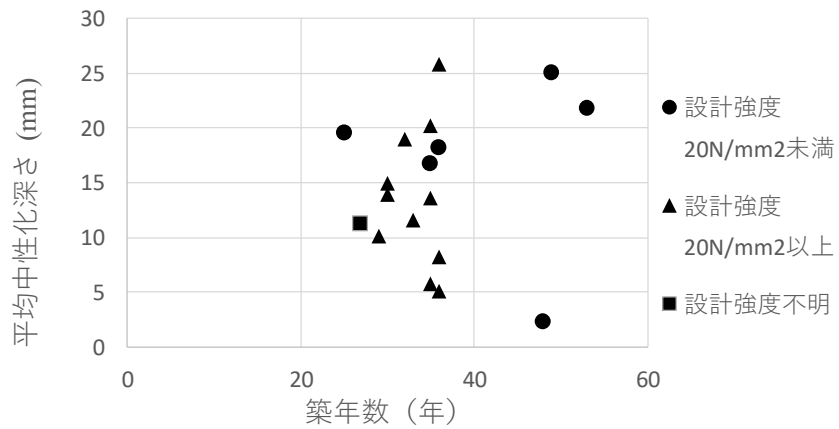


図 6.4-3 中性化深さの平均 (設計強度別)

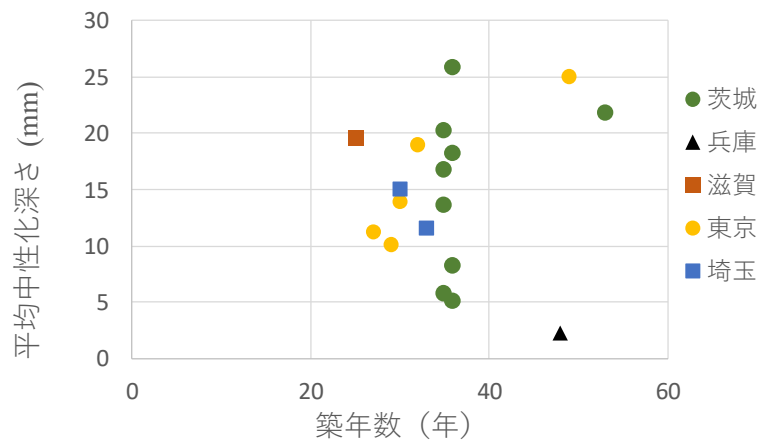


図 6.4-4 中性化深さの平均 (地域別)

### 6.4.3 累積ひび割れグレードと中性化深さの関係性について

表 6.4-1 の調査対象のひび割れ調査結果を基にした遷移確率の平均値を表 6.4-2 に、その遷移確率を用いたマルコフ連鎖モデルによる劣化の予測結果を図 6.4-5 に示す。限界年数を 13 年と仮定した各調査対象の累積ひび割れグレードと中性化深さの平均の関係を図 6.4-6 に示す。累積ひび割れグレードと中性化深さの間にある程度の相関性は確認できるが、同様な環境にあった建築物だけを対象とした結果(図 6.3-1)と比べると相関性は低い。これは、同じような環境にある建築物については温度、湿度、日射量などの環境によって異なる劣化外力が比較的近い形で作用するが、異なる環境にあるものを同一組上で評価した場合はその差異の影響が大きくなったものと思われる。外装仕上塗材の耐用年数を考える場合にはこれらの劣化外力を個々に考慮する必要はあるものの、一方で累積ひび割れグレードが大きくなるほど緩やかに中性化深さが大きくなる傾向が認められることは、複層塗材を対象とした表層ひび割れと中性化抑制効果の間には定性的な関連のある可能性が示されたと考ええる。

表 6.4-2 遷移確率

	$x_0$	$x_1$	$x_2$
最大値	0.384	0.432	0.400
最小値	0.000	0.015	0.004
平均値	0.121	0.162	0.208

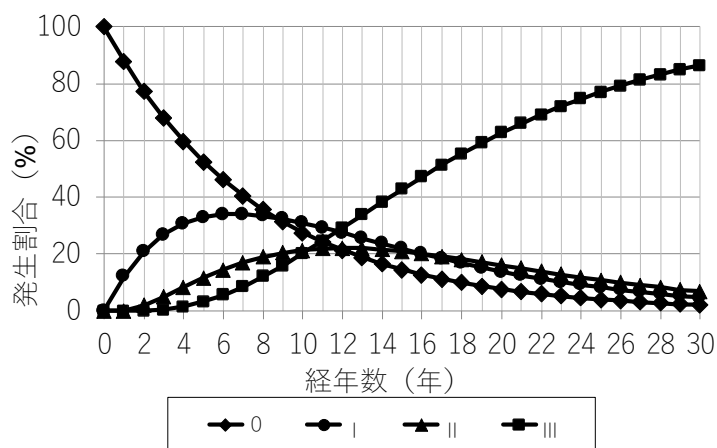


図 6.4-5 マルコフ連鎖モデルを用いた表層ひび割れの予測



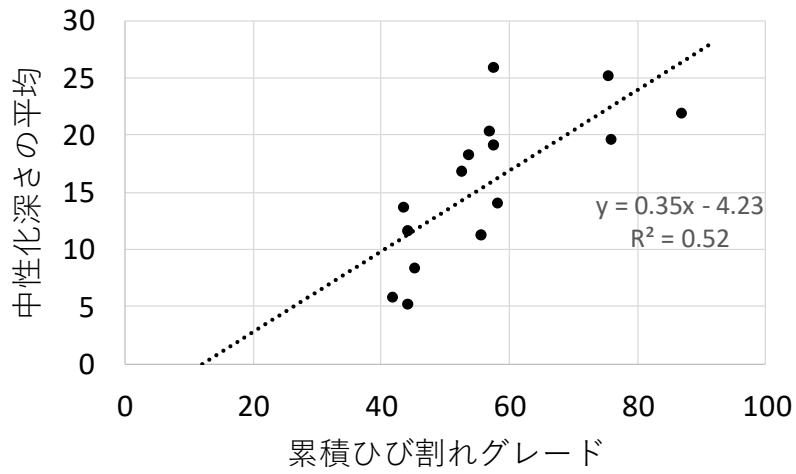


図 6.4-6 累積ひび割れグレードと中性化深さの関係  
(異なる環境に置かれた建築物)

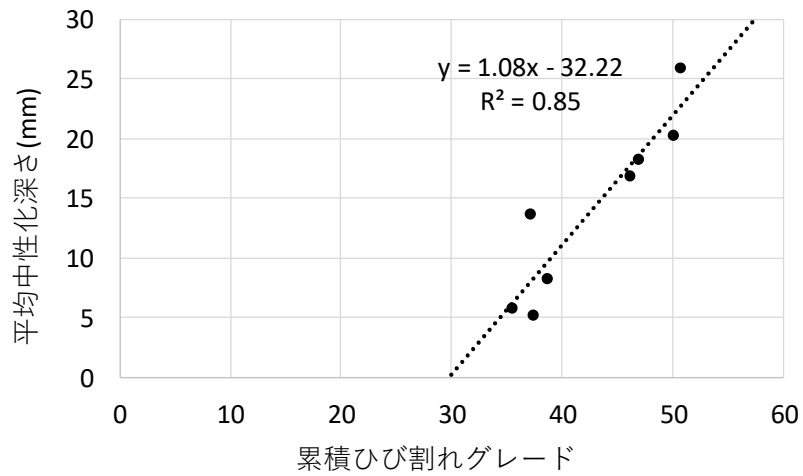


図 6.3-1 (再掲) 累積ひび割れグレードと中性化深さの関係  
(同一の環境に置かれた建築物)

## 6.5 まとめ

外装仕上塗材の劣化現象の 1 つである表層ひび割れに着目し、経年によるひび割れの劣化度合の積み重ねに関して累積ひび割れグレードという尺度を用いることで、外装仕上塗材の劣化を加味した躯体コンクリートの中性化の進行について考察を行った。得られた知見を以下に示す。

- 1) 経年による外装仕上塗材のひび割れの積み重ねを表す累積ひび割れグレードを設定し、同一の環境に置かれた建物群の中性化深さとの関係を確認したところ、相関性が確認された。これは外装仕上塗材の表層ひび割れと中性化抑制効果の間に相関がある可能性を示していると考えられる。
- 2) 異なる環境に置かれた建物群の中性化深さと累積ひび割れグレードの関係について確認したところ、ある程度の関係性は確認できたが、同一の環境に置かれた建物群の結果と比べると相関性が低い。これは、同じような環境にある建築物については温度、湿度、日射量などの環境によって異なる劣化外力が比較的近い形で作用するが、異なる環境にあるものを同一組上で評価した場合はその差異の影響が大きくなったものと思われる。
- 3) 一方で累積ひび割れグレードが大きくなるほど緩やかに中性化深さが大きくなる傾向が認められることは、外装仕上塗材のひび割れと中性化抑制効果の間には定性的な関連のある可能性が示されたと考える。

【6章における参考文献】

- 1) 浜田稔：コンクリートの中性化と鉄筋の腐食，セメント・コンクリート論文集，No.272，1969
- 2) 岸谷孝一：鉄筋コンクリートの耐久性，鹿島建設技術研究所出版，1963
- 3) 日本建築学会：コンクリートの調合設計・調合管理・品質検査指針案・同解説，1976
- 4) 依田彰彦：高炉セメントコンクリートの中性化，セメント・コンクリート，No.429.1982.11
- 5) 馬場明生，千歩修：各種の表面層を持つコンクリートの中性化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，Vol.9，No.1，pp.333-338，1987
- 6) 李榮蘭，榊田佳寛：表層コンクリートの品質と中性化進行に関する解析的検討，日本建築学会構造系論文集，vol.75，No.649，pp.499-504，2010.5
- 7) 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，pp.1539-1545，2013.9

## 第7章 外装仕上塗材の耐用年数に関する提案

### 7.0 abstract

The service life of the exterior finish coating material varies depending on what state it is considered as a lifetime. In this chapter, we propose the setting of the service life based on several values. First, we propose the service life for reworking of exterior finish materials to make buildings as long as possible without progressing neutralization of framed concrete. Next, we propose the minimum service life of exterior finish materials required for buildings to be used up to the number of years desired by the owner of the buildings. Next, we compare these service lives with the commonly used service life. The findings obtained in this chapter are shown below.

(1) It is expected that the buildings surveyed in this paper can be repaired every 11 years so that neutralization of concrete can be maximized. In that sense, it can be considered that the service life of the exterior finish coating material can be regarded as 11 years.

(2) When assuming that the cover thickness is 30 mm and the service life is 100 years, by repainting the exterior finish paint every 22 years, neutralization of the framed concrete was expected not to reach the rebar even after 100 years. In that sense, it can be considered that the service life of the exterior finish coating material can be regarded as 22 years.

(3) The service life focusing on ease of renovation and economic efficiency fulfilled the service lives proposed in this chapter.

### 7.1 はじめに

外装仕上塗材がどのような状態になった時を寿命と考えるかによってその耐用年数は異なってくる。日本建築学会編集の「建築物の耐久計画に関する考え方」[1]における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。一方で、外装仕上塗材には鉄筋コンクリートに対して躯体保護性能が求められているため、中性化抑制効果が一定値よりも少なくなった時に寿命を迎えたと考えることもできる。更には、施主、発注者、設計者、施工者、材料部材製造者、維持管理者間の合意に基づく年数と考えらえる。本章では幾つかの価値観に基づいた耐用年数の設定に関する提案を行う。

なお、本章においては、外装仕上塗材の種類の一つである複層仕上塗材について検討を行う。

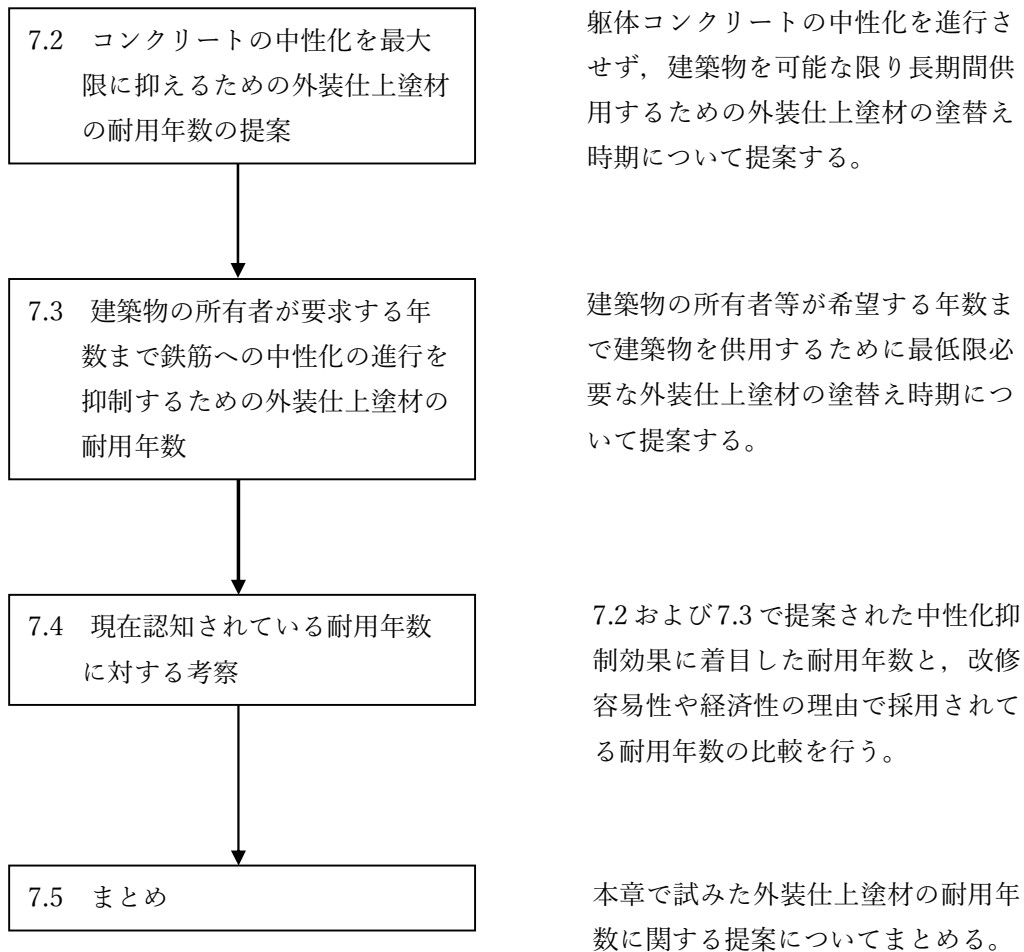


図 7.1-1 7章のフローチャート

## 7.2 コンクリートの中性化を最大限に抑えるための外装仕上塗材の耐用年数

図 6.3-1 における近似直線では、累積ひび割れグレードが約 30 の時点から中性化の進行が始まっており、すなわち、累積ひび割れグレードがある程度進行するまでの間は外装仕上塗材の中性化抑制効果が十分に機能し、躯体コンクリートへの二酸化炭素の流入を遮断していることが予想される。

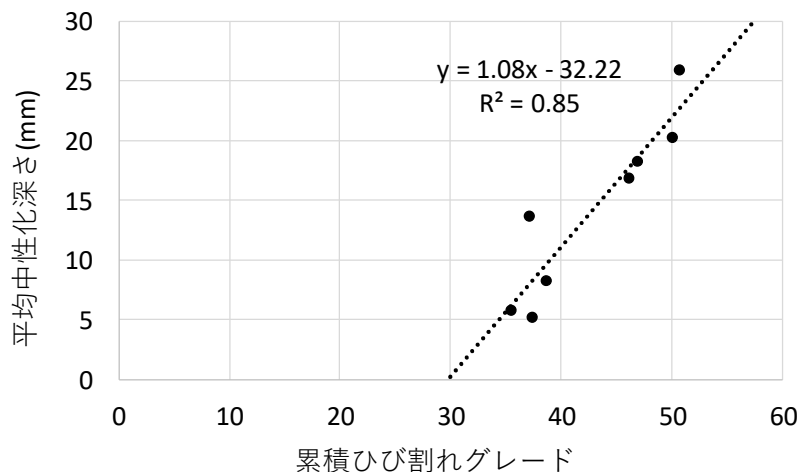


図 6.3-1 (再掲) 累積ひび割れグレードと中性化深さの関係

ここで、平均ひび割れグレードが一定値以下の時には建築物全体としての中性化がおおよそ抑制され、一定値を超えると中性化の進行が著しくなると仮定し、式 7.2-1 に示すように、平均ひび割れグレードが一定値に達してからの年数と各経年における平均ひび割れグレードの一定値からの超過度を考慮した累積超過ひび割れグレードを設定し、中性化深さとの関係の考察を行うこととする。累積超過ひび割れグレードの概念図を図 7.2-1 に示す。

$$D_b = \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^{T(n)-L} (d_n(L+t) - d_n(L)) \dots \text{(式 7.2 - 1)}$$

ここで、 $D_b$  は累積超過ひび割れグレード、 $N$  は外装仕上塗材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)、 $L$  は外装仕上塗材の平均ひび割れグレードが一定値に達した年数(年)、 $d_n(x)$  は  $n$  回目の塗装の経年数  $x$  時の平均ひび割れグレードを表し、経年数が外装仕上塗材の平均ひび割れグレードが一定値に達した年数を超える場合( $x > L$ )のみ考慮す

る。

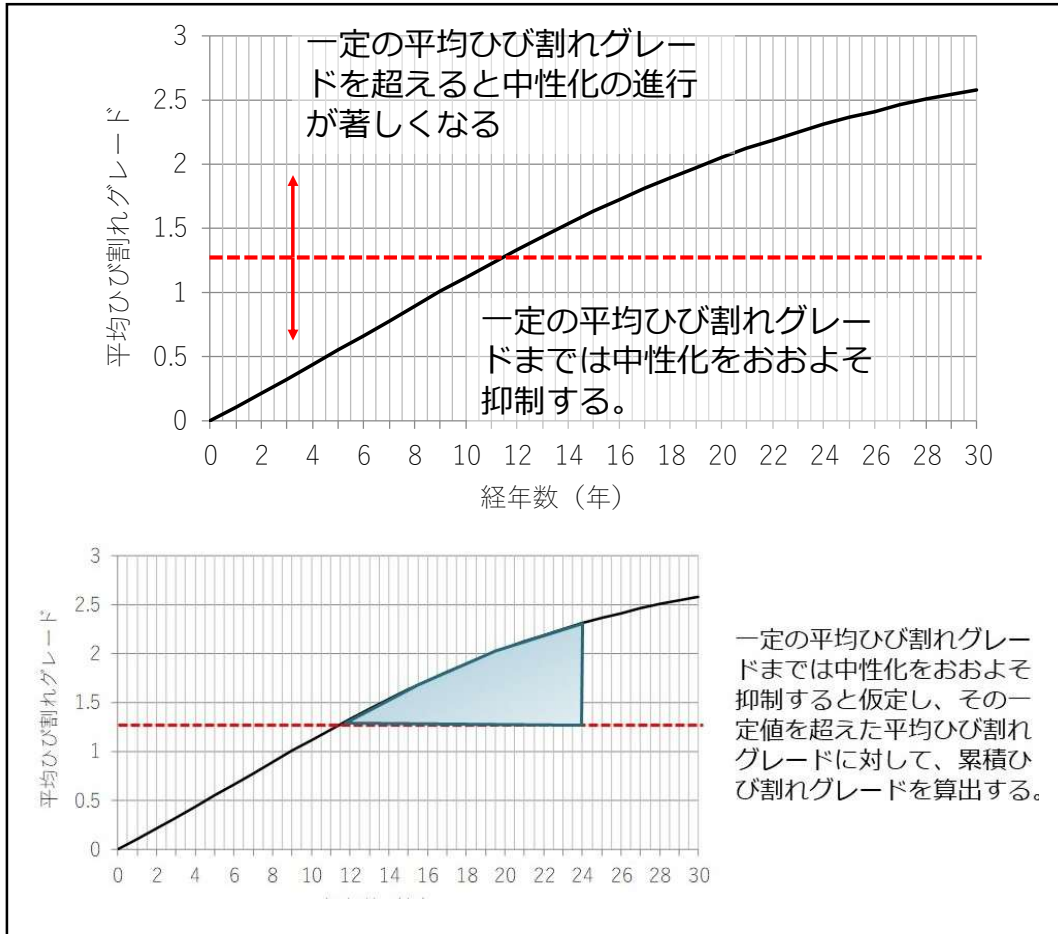


図 7.2-1 累積超過ひび割れグレードの概念図

ここで表 3.2-1 の調査対象に対し、建築物全体としての中性化がおおよそ抑制される平均ひび割れグレードの一定値が「0.0」、「1.0」および「2.0」と想定した時の累積超過ひび割れグレードと中性化深さの関係を図 7.2-2 に示す。一定値を「0.0」と想定した場合は前述したように、一定の累積超過ひび割れグレードまでは中性化を抑制しており、一定値を「2.0」と設定した場合は耐用年数を 0 年に設定した場合は累積超過ひび割れグレードが発生する前に中性化の進行が始まっていることを示している。そこで、近似した直線が原点(中性化深さ 0mm, 累積超過ひび割れグレード 0)に近づくような平均ひび割れグレードの一定値の設定を検討した。すなわち、平均ひび割れグレードが一定値に達した時点からコンクリートの中性化が進行する、という考え方を基に検討する。

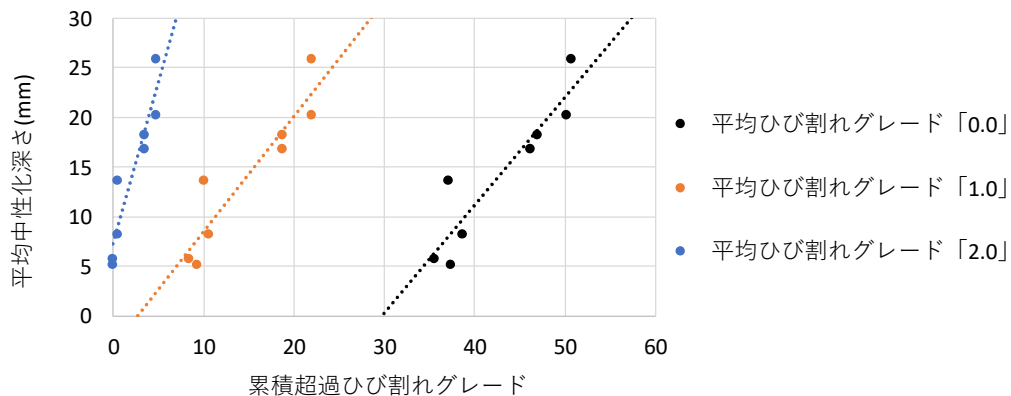


図 7.2-2 累積超過ひび割れグレードと中性化深さの関係

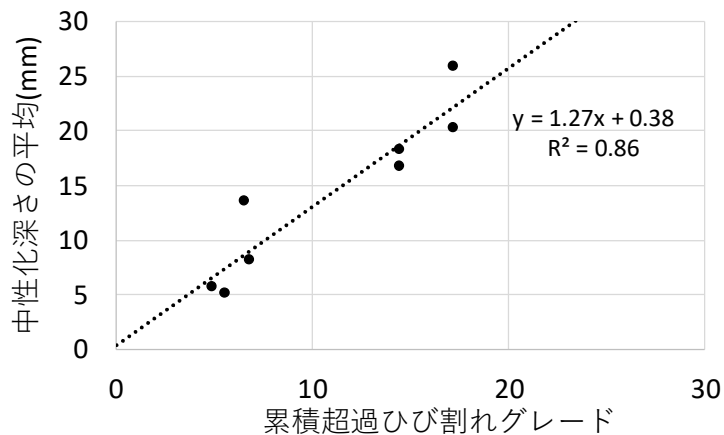


図 7.2-3 累積超過ひび割れグレードと中性化深さの関係  
(一定値が「1.2」の場合)

様々な平均ひび割れグレードの一定値を検証した結果、今回の調査対象においては平均ひび割れグレードが「1.2」の時に近似した直線が原点に最も近くなった。図 7.2-3 に平均ひび割れグレードの一定値を「1.2」とした場合の累積超過ひび割れグレードと中性化深さの関係を示す。この結果は、建物全体のひび割れグレードの平均がおおよそ「1.2」程度となった時に中性化の進行が始まる可能性を示している。

また、図 7.2-4 に示すように、平均ひび割れグレードが「1.2」に達するのは、外装仕上塗材の経年数がおおよそ 11 年に達した時点と予想される。

以上、今回調査した外装仕上塗材に関しては、11 年以内に累積超過ひび割れグレードが発生しない範囲で塗替えをすることによって、外装仕上塗材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



して位置付けることができると考える。

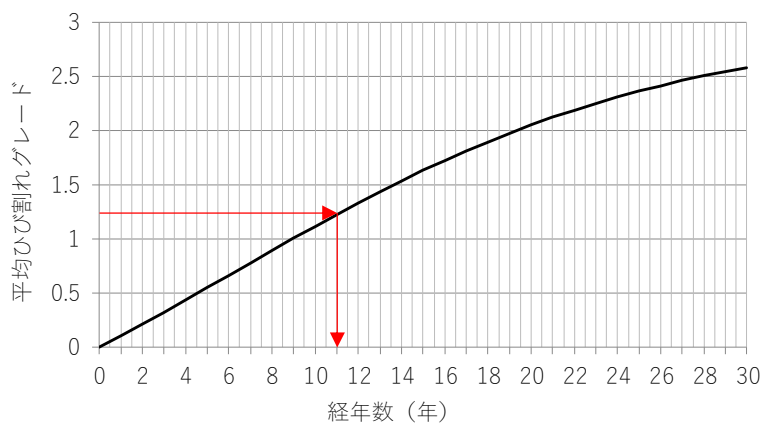


図 7.2-4 平均ひび割れグレードの予測

また、中性化が 11 年程度から発生する理由としては、調査対象のひび割れに関する実際の調査結果（図 3.2-17）に示されるように、外装仕上塗材の表層ひび割れが同時期（11 年程度）から著しく進行するためであると考えられる。

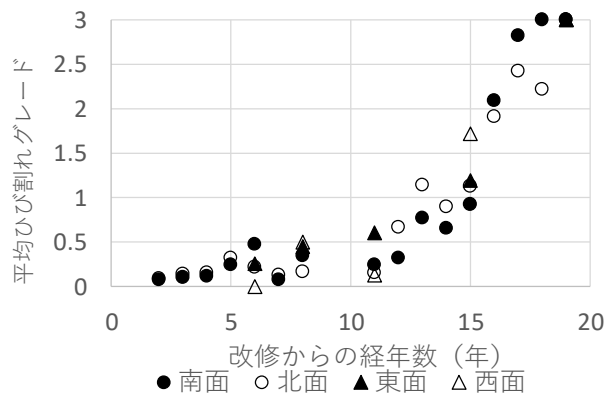


図 3.2-17 (再掲) 経年数におけるひび割れグレード (各方位)

### 7.3 建築物の所有者が要求する年数まで鉄筋への中性化の進行を抑制するための外装仕上塗材の耐用年数

表 3.2-1 の調査対象について、式 7.2-1 により、経年数と累積超過ひび割れグレードの関係は図 7.3-1 のように示される。また、前節の図 7.2-3 に示された建築物全体としての中性化がおおよそ抑制される平均ひび割れグレードの一定値を「1.2」と設定した時の累積超過ひび割れグレードと中性化深さの関係の近似式を用いることにより、経年数と中性化深さの関係は図 7.3-2 のように示される。

ここで、当該建物を対象に、建築物の要求耐用年数を仮に 100 年として、竣工後 100 年の間に中性化が 30mm に達しない塗り替え間隔を外装仕上塗材の耐用年数とする考えも想定することができると思われる。そこで外装仕上塗材の改修間隔と経年数が 100 年に到達した時の建築物の中性化深さの予測を表 7.3-1 に示す。このことから、この建物において使用されている外装仕上塗材を 22 年毎に塗り替えれば建築物の経年数が 100 年に到達したときに鉄筋まで中性化が届かないと算定され（図 7.3-3 参照）、前述の耐用年数を準用した考え方として位置付けることができる。

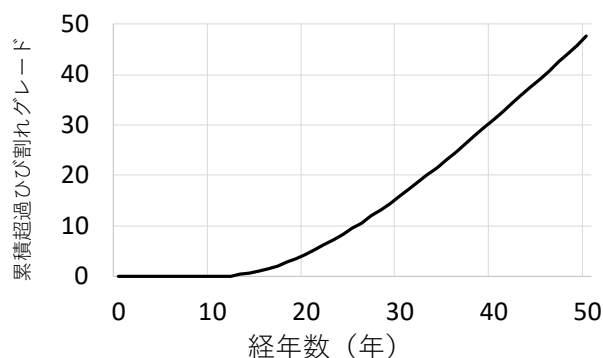


図 7.3-1 累積超過ひび割れグレードの予測

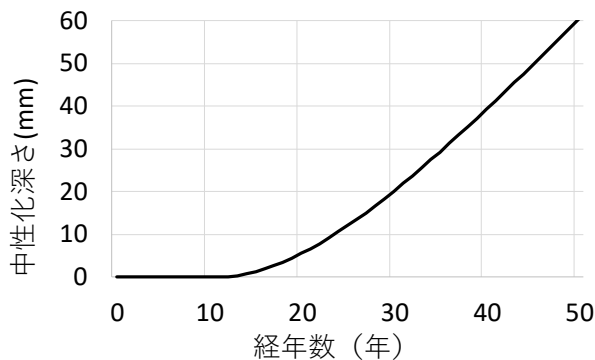


図 7.3-2 中性化深さの予測

表 7.3-1 外装仕上塗材の改修間隔と経年数が 100 年に到達した時の  
建築物の中性化深さの予測

改修間隔	中性化予測(mm)	改修間隔	中性化予測(mm)
30 年	55.19	25 年	42.29
29 年	50.56	24 年	36.79
28 年	47.23	23 年	31.59
27 年	45.07	22 年	26.84
26 年	43.95	21 年	24.10

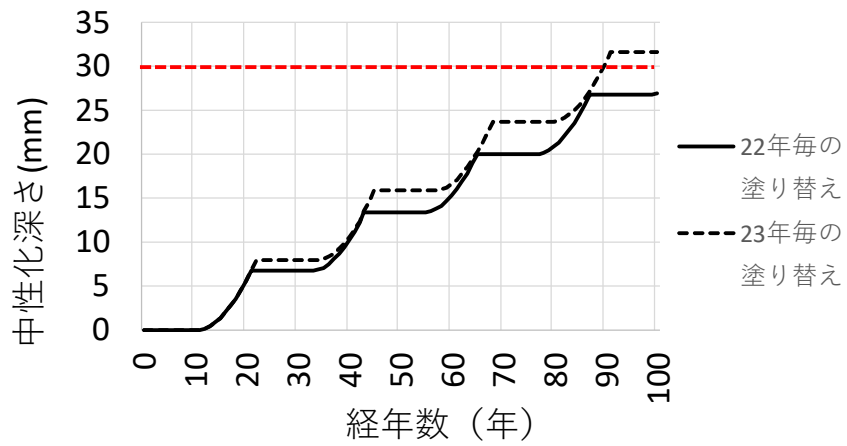


図 7.3-3 中性化深さの予測 (改修間隔 22 年および 23 年)

#### 7.4 現在認知されている耐用年数に対する考察

本論文では外装仕上塗材の持つ躯体コンクリートに対する中性化抑制効果に着目し、塗付け時からの経年により、日射、降雨、温度等の諸要因の影響によって外装仕上塗材が劣化し、中性化抑制効果が低下していくことに起因する耐用年数について検討した。しかし、実際の建築物に施工されている外装仕上塗材の塗り替えに関しては、中性化抑制効果に起因した理由ではなく、塗り替え・改修の容易性や経済性に起因した理由で耐用年数が設定され、塗り替えが行われることが多い。そこで本節では、一般に認知されているそれらの耐用年数と、本論文で提案された中性化抑制効果に着目した耐用年数を比較することにより、実際の建築物の塗り替えタイミングが中性化抑制効果の面で十分であるかの検討を行う。

##### 7.4.1 塗替えの容易性に着目した耐用年数との比較

一般社団法人日本建築学会編集「建築物の耐久計画に関する考え方」[1]の「6 鉄筋コンクリート造外装の耐用年数の推定方法の例（仕上塗材仕上げの場合）」では、耐用年数に達するときの劣化の程度を、「コンクリートまたはセメントモルタル面に施された塗膜が劣化して、ひび割れ、はがれなどを生じ通常の部分的な修繕では性能を回復することができない状態となった時期を、耐用年数に達したものとする」としている。これは塗膜自体の性能ではなく、塗膜修繕の容易性に着目した耐用年数であると考えられる。また、同書において、標準耐用年数の例として表 7.4-1 を掲載している。

表 7.4-1 標準耐用年数(Ys)の例

区分	例	標準耐用年数
薄付け仕上塗材 JIS A 6909	合成樹脂エマルション系塗材	7
複層仕上塗材 JIS A 6910	アクリル系複層塗材 E	10
厚付け仕上塗材 JIS A 6915	セメント系厚付け塗材	12

出展：「建築物の耐久計画に関する考え方」 p.169

表 3.2-1 の調査対象について表 7.4-1 の耐用年数を適用する場合、外装仕上塗材は「複層塗材」であるため、耐用年数は「10 年」が適用される。これは、本章で得られた知見であるコンクリートの中性化を最大限に抑えるという価値観での耐用年数「11 年」とほぼ同様であり、建築物の所有者が要求する供用年数（100 年）を満たすための耐用年数「22 年」を満たしていることが確認された。

#### 7.4.2 経済性に着目した耐用年数との比較

曾我らは関東近辺の団地型分譲マンション41団地365棟について修繕周期の現状について報告しており[2]、仕上塗材の種類ごとに修繕周期の平均を比較した結果として表7.4-2を示している。

表7.4-2 修繕周期の仕上塗材別比較

仕上塗材種類	修繕周期（年）	細分類	修繕周期（年）
マスチック	11.4	マスチックC	11.3
		マスチックA	12.0
複層塗材	11.4	アクリル系	11.3
		アクリルシリコン系	11.3
		シリコン系	10.5
		ウレタン系	12.5
外装薄塗材	12.5	外装薄塗材C	12.3
		外装薄塗材E	13.0

出展：曾我裕希,新岡輝雄,渡辺一弘,石田和雄,濱崎仁：長期修繕計画における修繕周期の見直しに関する研究,日本建築仕上学会 2018 年大会学術講演会研究発表論文集,pp.73-76,2018,10(表4)

ここに挙げられた修繕周期は、仕上塗材の種類に関わらずほぼ同様となっているが、これはマンションにおいては外壁を修繕する際に足場を設置することが一般的であるが、足場設置の費用が高額となるため、外壁に関わる材料（外装仕上塗材、シーリング、防水材等）を纏めて大規模な修繕を実施することが多いためであると考えられる。つまり、外装仕上塗材よりも耐用年数が短い材料に合わせて足場を設置し、大規模修繕を実施しているため、外装仕上塗材の種類に関わらず修繕周期が同様となっていると予想され、これは仕上塗材自体の性能ではなく、建物の修繕に関する経済的な理由に起因した耐用年数の設定であると考えられる。

表3.2-1の調査対象について表7.4-2の耐用年数を適用する場合、外装仕上塗材は「複層塗材」であるため、耐用年数は「11.4年」が適用される。これは、本章で得られた知見であるコンクリートの中酸化を最大限に抑えるという価値観での耐用年数「11年」とほぼ同様であり、建築物の所有者が要求する供用年数（100年）を満たすための耐用年数「22年」を満たしていることが確認された。

## 7.5 まとめ

本章においては第3章～第7章で得られた知見をもとに、鉄筋コンクリート造建築物の中性化に着目した外装仕上塗材（複層仕上塗材）の耐用年数の推定方法を提案した。また、現在認知されている外装仕上塗材の耐用年数が躯体コンクリートに対する中性化抑制の面で十分であるかの検討を行った。得られた知見を以下に示す。

- (1) 今回調査した建築物に関しては最長でも11年毎に塗り替えることにより、コンクリートの中性化を最大限に抑えられることができると予想された。その意味での外装仕上塗材の耐用年数は11年であると位置づけることができると考えられる。
- (2) 今回調査した建築物のかぶり厚を30mmと仮定した場合、施主、発注者、設計者、施工者、材料部材製造者、維持管理者間の合意に基づく建築物の耐用年数を100年と想定した場合、外装仕上塗材を22年毎に塗り替えることにより躯体コンクリートの中性化は100年経過時も鉄筋に到達しないことが予想された。その意味での外装仕上塗材の耐用年数は22年であると位置づけることができると考えられる。
- (3) 現在認知されている外装仕上塗材の耐用年数を第3章で調査した建築物に適用する場合、本章で得られた知見を用いて中性化抑制効果の観点から検討した結果、いずれも躯体コンクリートの中性化を最大限に抑制する面での耐用年数とほぼ同様であり、建築物を所有者等が要求する年数（100年）供用するための耐用年数についても満たしていた。

【第7章における参考文献】

- 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) 曾我裕希, 新岡輝雄, 渡辺一弘, 石田和雄, 濱崎仁: 長期修繕計画における修繕周期の見直しに関する研究, 日本建築仕上学会 2018 年大会学術講演会研究発表論文集, pp.73-76, 2018, 10

## 第 8 章 結論および今後の課題

### 8.0 abstract

In this study, first, we investigate the deterioration state of actual buildings and propose a deterioration prediction method of exterior finish paint by using Markov chain model which is one of probability theories. In addition, we propose a service life focusing on the neutralization inhibiting effect of the exterior finish coating material on the concrete. In this chapter, we summarize the results obtained in this research.

In chapter 3, we surveyed 4 buildings of reinforced concrete apartment building from 2012 to 2016. As a result, regularity was confirmed with respect to cracks.

In chapter 4, we proposed that the Markov chain model, which is one of the probability theory, has irreversible characteristics and is suitable as a method for predicting cracks.

In chapter 5, first, we confirmed the relationship between the crack of the overcoating material of the exterior finish and the surface permeability of the top coat at the laboratory level. Next, we confirmed the relationship between surface cracks and surface permeability of exterior finish materials applied to actual buildings.

In chapter 6, we set a “cumulative cracking grade” that represents the stacking of cracks in exterior finish. We confirmed the relationship between cumulative crack grade and neutralization depth of buildings. We considered that there was a possibility of qualitative relationship between the cracking of the exterior finish coating material and the neutralization inhibiting effect.

In chapter 7, first, we propose the service life for reworking of exterior finish materials to make buildings as long as possible without progressing neutralization of framed concrete. Next, we propose the minimum service life of exterior finish materials required for buildings to be used up to the number of years desired by the owner of the buildings. Last, we confirmed that the service life focusing on ease of renovation and economic efficiency fulfilled the service lives proposed in this chapter.

### 8.1 はじめに

本研究では、外装仕上塗材の劣化進行について確率論モデルの 1 つであるマルコフ連鎖モデルを用いて予測手法の開発を試みた。また外装仕上塗材の劣化予測と実建築物の透気性および中性化深さの調査結果を用いることにより、外装仕上塗材の劣化と共に低下する中性化抑制効果を加味した鉄筋コンクリートの中性化進行および建築物自体の耐用年数に関する検討をおこなった。

本章では、本研究で得られた成果と要約を示すとともに、今後の検討課題について述べる。

### 8.2 結論

第 1 章「序論」として、研究背景や目的について述べた。



第2章「既往の研究」では、コンクリートの中性化予測を目的とした日本国内での動向を示した。

第3章「実建築物に施工された外装仕上塗材の劣化調査」においては、同様の環境に建てられた建築群の外壁に施工された外装仕上塗材の非破壊試験による劣化データを収集し、経年における劣化進行について確認を行った。光沢度、色差、白亜化といった劣化に関しては経年に対しての純粋な劣化進行が確認されなかったが、表層ひび割れについては経年による劣化進行が確認された。

第4章「マルコフ連鎖モデルを用いた劣化予測手法の提案」においては、外装仕上塗材に生じる劣化の予測手法の提案を行った。本研究は外装仕上塗材の劣化による躯体コンクリートに対する中性化抑制効果の変移を予測することを目的としているが、調査対象の劣化状況はその時点に関するものであり、中性化の将来的な予測を行うためには、外装仕上塗材の劣化についても将来的な予測を行う必要がある。そこで外装仕上塗材の劣化予測に対して、確率論の1つであり、建築・建設分野においても活用されているマルコフ連鎖モデルの利用を試みることとした。マルコフ連鎖モデルは不可逆性の特徴を持つが、前述のように外装仕上塗材の表層ひび割れは経年により単純増加する傾向が見られたため、表層ひび割れに対してマルコフ連鎖モデルを適用し、劣化予測手法の開発を行った。

第5章「ひび割れと表層透気性の関係についての検討」では、外装仕上塗材の表層ひび割れが、外装仕上塗材が施された外壁の表層透気性に与える影響について検討を行った。まず、実験室レベルでの検証により、外装仕上塗材の1種である複層仕上塗材の上塗材に関してひび割れと表層透気性の関係性を確認した。次に、実際の建築物を調査することにより、複層仕上塗材の表層ひび割れと外装仕上塗材が施された外壁の表層透気性の関係について確認を行った。以上の検証により、外装仕上塗材の表層ひび割れが表層透気性に影響を与える可能性があることが示された。

第6章「外装仕上塗材の表層ひび割れと中性化抑制効果の関係についての検討」では、外装仕上塗材の表層ひび割れが躯体コンクリートの中性化進行に与える影響について検討を行った。既往の研究により、コンクリートの表層透気性と中性化進行の速さの間には関係性があることが報告されていたため、第5章で得られた外装仕上塗材の表層ひび割れと表層透気性の関係についての知見を用いることにより、外装仕上塗材の表層ひび割れと中性化抑制効果の間の関係性の確認を試みた。実建築物の中性化進行を考えた場合、経年による外装仕上塗材の劣化を加味する必要がある。そこで、第3章で開発した外装仕上塗材のひび割れの予測手法を応用することにより、表層ひび割れ進行の経年における積み上

げの指標となる累積ひび割れグレードを仮定し、累積ひび割れグレードと実際の建築物の中性化深さの関係を確認したところ、一定の相関が確認された。このことにより、外装仕上塗材の表層ひび割れが外装仕上塗材の中性化抑制効果に影響を与える可能性を示した。

第7章「外装仕上塗材の耐用年数に関する提案」では、鉄筋コンクリート造建築物の外壁に対する中性化抑制効果に着目し、外装仕上塗材（複層仕上塗材）自体の耐用年数について第6章で得られた知見を基に検討を行った。外装仕上塗材は躯体コンクリートの中性化を抑制する役割を持っているが、施工される建築物自体がどのような価値観で耐用年数を設定されるかによって、外装仕上塗材の耐用年数は影響を受ける。

本研究においてはまず、対象となる建築物が中性化という要素において可能な限り長期間使用されることを目標としていると仮定し、外装仕上塗材の耐用年数設定を試みた。躯体コンクリートの中性化進行に影響を与えるひび割れグレードの蓄積について累積超過ひび割れグレードという指標を仮定し、この累積超過ひび割れグレードが発生しない範囲において塗り替えを実施すれば、中性化は進行しないと考えられ、今回調査した建築物については11年毎に塗り替えることにより中性化を最大限に抑制することができ、この意味での外装仕上塗材の耐用年数は11年であると予測された。

次に、施主等が協議により建築物に対して特定の年数を耐用年数と定めたと仮定し、外装仕上塗材の耐用年数設定を試みた。建築物の耐用年数を100年、鉄筋コンクリートのかぶり厚を30mmと仮定した場合、100年の間に中性化が30mm進行しないように外装仕上塗材を塗り替える必要があるが、累積ひび割れグレードを用いて外装仕上塗材の劣化を加味した中性化進行の予測を行ったところ、今回調査した建築物においては22年毎に塗り替えることにより100年後の中性化進行を30mm未満に抑えることができ、この意味での外装仕上塗材の耐用年数は22年であると予測された。

### 8.3 今後の課題

本研究で示された知見より得られた検討課題を以下に示す。

(1) 第3章では、非破壊調査として外装仕上塗材の表層ひび割れの他に、光沢度保持率、変退色および白亜化の調査を実施しているが、本研究においてはその結果を活かすことができなかった。一般的に外装仕上塗材施工後においては光沢度の低下や変退色が発生し、遅れて数年後に白亜化が発生するが、いずれも表層ひび割れよりは早期に発生する傾向がある。これらの劣化現象と外装仕上塗材の中性化抑制効果の関係、または、これらの劣化現象と表層ひび割れの間関係を見いだせることが出来れば、より早期に中性化抑制効果の予測や予測の補正を行うことができると考えられる。今後の課題としたい。

(2) 第4章では、確率論の一つであるマルコフ連鎖モデルを用いて外装仕上塗材の劣化の一つである表層ひび割れの予測手法について提案を行ったが、予測結果と実建築の実際のひび割れ状況に関して相関性を確認するには至らなかった。今後、調査対象を増やすことにより、データのバラツキ等を踏まえたうえでの検証を行っていききたい。

(3) 第5章では、特定の建築物を調査することにより外装仕上塗材の表層ひび割れと表層透気性の関係性について言及しているが、その明確なメカニズム（特に複層仕上塗材における主材層）について触れているわけではないので、異なる建築物については関係性が見いだせない恐れがある。調査対象を増やすことにより関係性に対して信頼性が確認できることが期待できる。また、外装仕上塗材のひび割れと透気性の関係について化学的知見により検証することにより、メカニズムを解明できる可能性もある。今後の課題としたい。

(4) 第7章では、外装仕上塗材の劣化を加味した建築物の中性化進行について予測を行っているが、予測結果の妥当性についてはより多くの建築物を調査することにより検証を行う必要がある。今後の課題としたい。

(5) 本研究で得られた知見を活用するためには、本研究で調査した建築物と他の建築物との差異（外装仕上塗材の種別、立地・環境、施工される部位・方位、施工条件、維持管理条件）に対してなんらかの補正を行う必要があると考えられる。ISO15686-1では耐用年数を推定する方法の一つとしてファクターメソッド（Factor Method）が示されているが、ファクターメソッドの各係数に該当する補正について、今後検討を行いたい。

(6) 本研究ではひび割れと中性化深さの検討を行う際に、調査対象全体の平均ひび割れグレードと調査対象毎の中性化深さの平均を用いているが、調査個所が偏れば結果が異なってくる恐れがある。また、ひび割れグレード毎に表層透気性は異なると考えられ、特定グレード以上のひび割れのみを調査対象とした方が的確に耐用年数を予想できる可能性が考えられる。今後調査対象を増やすことにより検討を行いたい。