

# 学位論文

実建築物の中性化に及ぼす各種影響の解明と  
劣化評価への応用

平成 29 年 3 月

田沼 毅彦

# 実建築物の中性化に及ぼす各種影響の解明と劣化評価への応用

## 目次

### 第1章 序論

1.1 本研究の背景および目的	1
1.2 本研究の方針	3
1.3 本論文の構成	4

### 第2章 既往の研究

2.1 はじめに	7
2.2 中性化に及ぼす各種要因	7
2.2.1 圧縮強度	7
2.2.2 仕上げ材	13
2.2.3 方位	15
2.2.4 温度・湿度	17
2.3 まとめ	21

### 第3章 実建築物の個別詳細調査による中性化と鉄筋腐食の実態把握

3.1 はじめに	25
3.2 中性化深さの実態調査	25
3.2.1 調査概要	25
3.2.2 調査結果	30
3.3 鉄筋腐食状況の実態調査とその要因分析	42
3.3.1 調査概要	42
3.3.2 調査結果	47
3.4 まとめ	60

### 第4章 実建築物の打放しコンクリート部分における中性化の実態と評価

4.1 はじめに	62
4.2 調査方法	62
4.2.1 コア供試体を採取した建築物の概要	62
4.2.2 コア供試体の採取位置および採取方法	64
4.2.3 圧縮強度の試験方法および中性化深さの測定方法	65
4.2.4 実建築物における温度・相対湿度の実測概要	65
4.2.5 分析方法	67
4.3 調査結果および考察	69

4.3.1	中性化に及ぼす圧縮強度の影響	69
4.3.2	中性化に及ぼす方位および温湿度の影響	74
4.4	まとめ	81
<b>第5章 実建築物の中性化進行の予測における促進中性化試験の適用手法</b>		
5.1	はじめに	83
5.2	促進中性化試験データの分析	83
5.2.1	データ収集および分析方法	83
5.2.2	分析結果および考察	88
5.3	促進中性化の進行と実環境における実建築物の中性化の進行の関係	94
5.3.1	中性化速度係数比の算出	94
5.3.2	中性化速度係数比の比較および考察	97
5.4	まとめ	99
<b>第6章 実建築物のモルタル仕上げが施されたコンクリート部分における中性化の実態と評価</b>		
6.1	はじめに	102
6.2	調査方法	102
6.2.1	コア供試体を採取した建築物の概要	102
6.2.2	コア供試体の採取位置および採取方法	105
6.2.3	圧縮強度の試験方法および中性化深さ・モルタル仕上げの塗厚の測定方法	106
6.2.4	中性化進行の理論モデルの適用による中性化の評価方法	106
6.3	調査結果および考察	108
6.3.1	圧縮強度・中性化深さ・モルタル仕上げの塗厚	108
6.3.2	見かけの中性化速度係数と圧縮強度およびモルタル仕上げの塗厚の関係	116
6.3.3	中性化に及ぼすモルタル仕上げの影響	118
6.3.4	中性化に及ぼす方位および温湿度の影響	121
6.4	まとめ	126
<b>第7章 実建築物の合理的な劣化評価手法の提案</b>		
7.1	はじめに	128
7.2	実建築物の合理的な劣化評価手法の提案	128
7.2.1	概要	128
7.2.2	劣化評価手法のフローと内容	129
7.3	劣化評価手法の検証	134
7.3.1	検証および検証対象建築物の概要	134
7.3.2	検証結果	135

7.4 まとめ .....	138
第8章 結論 .....	140
謝辞	
本研究に関する発表論文	

## 第1章 序論

### 1.1 本研究の背景および目的

持続可能社会において環境負荷低減が求められる時代となり、建築物においてもこれまでの短いライフサイクルでのスクラップ・アンド・ビルドから長期的にストックを供用することを重視する方向に施策や考え方が転換されてきている。国土交通省においては、新築住宅では長期優良住宅制度、既存住宅では長期優良住宅化リフォーム推進事業などの普及・推進によって良質なストック形成を目指しており、それらの認定基準では耐用年数を100年程度に想定している。既存ストックの現状として公的集合住宅を例に挙げれば、高度経済成長期を中心に昭和40年代までに大量建設された公的集合住宅は、公営住宅で約70万戸<sup>1-1)</sup>、公団住宅（現、UR賃貸住宅）で約37万戸<sup>1-2)</sup>のストックがあり、これらは国が当初、公営住宅法で想定していた耐用年数70年に対して、すでに築後40年以上が経過している。これらの住宅は、現在の住宅性能水準と照らせば、その性能を満たしていないことが多く、本来は建替や大規模改修などの手法により更新される時期を迎えつつあるが、厳しい財政状況などを踏まえて、適切に維持保全を行い、部分的な改修などにより住宅性能を向上しながら長寿命化を図ることが喫緊の課題となっている。

一般に、鉄筋コンクリート造（以下、RC造と略記）建築物の物理的な寿命は、鉄筋が耐力上問題となる形態にまで腐食した時点と考えられることから、多くの場合、鉄筋腐食を招く劣化要因の代表であるCO<sub>2</sub>によるコンクリートの中性化深さが重要な指標として検討され、その進行を精度よく予測することが、合理的に耐用年数を評価することにつながる。

このことから、建築物の新築工事に一般的に適用される日本建築学会「JASS5」<sup>1-3)</sup>では、設定した計画供用期間の級とその耐用年数に応じた所要の中性化速度係数を信頼性設計に基づき求め、それに対応するコンクリートの圧縮強度を耐久設計基準強度として定めている。また、日本建築学会「鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計施工指針・同解説」<sup>1-4)</sup>では、耐久設計に用いる中性化の劣化外力の算出は、中性化に及ぼす各種要因を既往の知見に基づき、諸係数として反映させた中性化速度式によるか、試験により定める場合は、JIS A 1153（コンクリートの促進中性化試験方法）によるとしている。しかし、促進中性化試験の結果で得られた中性化速度係数が、実環境での長期に渡る中性化の進行の何倍の状態に相当するかに関して明確に記述した研究は少ない。

また、築後ある程度の期間が経過した実建築物においては、更に長期間供用し続けることの可否を判断するにあたっては、躯体の劣化状況に関する調査・診断を行うことが不可欠であり、RC

造建築物では、日本建築学会「鉄筋コンクリート造建築物の耐久性調査・診断および補修指針(案)・同解説」<sup>1-5)</sup>などによりながら、コア採取によるコンクリート調査が実施され、コンクリートの圧縮強度、中性化深さなどの測定結果に基づいて耐久性が評価されることが多い。中性化深さは、部位や仕上げ材の種類によって異なるため、中性化深さの測定用試料の採取位置は、その建築物の代表的な中性化深さとなるように、例えば表 1.1-11<sup>6)</sup>に示す因子と水準を参考にして選定されるのが望ましい。

一方で、実建築物で実施される実務的なコンクリート調査では、調査時に騒音・振動・粉塵が発生することや専有部分への立ち入りには制限があることから調査可能な箇所は限定される場合が多く、建築物のある特定の環境条件下における調査結果に基づいて、建築物全体を評価せざる得なくなる。例えば、集合住宅では専有部分が配置されることが多い南側は調査箇所として選定されにくく、中性化深さのデータは南面以外の測定データに偏る傾向にある。しかし、建築物の外装面は、方位によって受ける日射量が異なり、同一建築物での温度差や湿度差などがコンクリートや仕上げ材の劣化進行の差異として無視できない程度の影響を与えている場合には、方位による違いを考慮して耐久性調査の結果を評価する必要がある。

また、建築物のコンクリートには一般的に仕上げ材が施され、その中性化抑制効果については以前から知られているところであり<sup>例えば、1-7)</sup>、耐用年数の評価にはその中性化抑制効果を見込むことが合理的である。一般的には、調査結果における実データをいわゆる $\sqrt{t}$ 則の式による中性化予測式によって近似し、仕上げ無し（打放し）に対する中性化速度係数の比として表していることが多い。しかし、この手法では、特にモルタル仕上げなどそれ自体が中性化することでコンクリート本体の中性化を遅らせる効果があるセメント系材料においては、コンクリートの中性化進行とその経過期間を適切に反映しておらず、任意の経過期間における中性化深さの予測に適用するには信頼性が低い。また、実建築物において仕上げ材の種類ごとにコンクリートの中性化速度が分析された報告例はあるものの<sup>1-8~1-10)</sup>、具体的に仕上げ材の中性化抵抗や中性化速度係数などの諸数値までは示されていない。コンクリートの中性化深さの測定結果に対する評価に仕上げ材による中性化抑制効果を実用レベルで反映できる簡易的な手法も見られないことから、実務で行われる劣化診断では結果として適切に考慮されていないことが多い。

そこで、本研究では、数多くの実建築物の中性化深さを調査し、そこから得た数多くのデータをもとに実建築物におけるコンクリートの中性化進行に及ぼす方位、圧縮強度、仕上げ材などの影響を定量的に解明し、建築物の劣化評価を合理的に行うための手法を提示することを目的とし

た。建築物の代表値としての妥当な中性化深さを得るための環境条件の把握や、ある限定的な条件で得られた中性化深さに対する建築物全体での位置づけの評価に資するものである。

表 1.1-1 中性化の測定箇所選定時に参考とすべき因子と水準<sup>1-6)</sup>

調査対象	因子
・部位 ・部材	屋内・屋外，方位，風向，海側・陸側，直接雨水がかかる・かからないなど 柱，梁，壁，床，庇，基礎など
・仕上げ材 ・コンクリート	種類，仕様，施工時期など 骨材の種類（普通・軽量），水セメント比，施工時期（夏期・冬期）

## 1.2 本研究の方針

実環境にある実建築物の中性化などの実態調査・分析にあたっては、1964～1994年に建設された公団住宅（現，UR賃貸住宅）を対象とし、構造体コンクリートから採取したコア供試体の中性化深さのデータに基づいて行うこととした。

公団住宅の場合、建設地は在京（東京，埼玉，神奈川，千葉），名古屋，大阪・京都・神戸における平野部都市圏が中心であり、地域間による気候などによる違いが少ない。また、コンクリートや仕上げ材について建設年代毎に共通の仕様を採用しており諸元が明らかであるほか、構工法・建物形状などについて同タイプのもので多く分類しやすい。なお、調査対象建築物の仕上げ材は、モルタル仕上げのうえにリシン，マスチック，吹付タイル，タイルなどが表層に施されているが、本研究では仕上げ材の基層として共通にあるモルタル仕上げによる影響を定量的に明らかにすることを目的とした。そのため、調査対象データとして、モルタル仕上げのうえの仕上げ材は中性化抑制効果の低いリシンのデータを抽出して検討を行った。また、施工品質や維持保全の水準についても、統一された工事共通仕様書や保全工事共通仕様書等によって、その仕様や品質は均質化されており、ある程度一定に保たれている。これらのことより、中性化深さのデータを収集して分析する場合に、環境条件の著しい相違や施工不良に起因する影響などの不確定要素はあらかじめ除外されているものとして取り扱った。

なお、本研究で対象とする建築物の劣化メカニズムとその劣化事象は、中性化によって生ずる鉄筋腐食である。塩害，アルカリシリカ反応，凍害，化学的浸食などによる劣化メカニズムならびにひび割れ，はく離，汚れ，欠損などの劣化事象は対象外とする。

### 1.3 本論文の構成

本論文は、全 8 章から構成されており、各章の概要は以下の通りである。また、図 1.3-1 には本論文の構成フローを示す。

第 1 章は序論として、本研究の背景と目的について述べ、研究の方針および構成を示した。

第 2 章では、実建築物の中性化に影響を及ぼす各種要因に関する既往の研究を文献調査し、それらの成果を取りまとめた。

第 3 章では、解体除却予定の実建築物 1 棟において、コア供試体採取とはつりによる調査を多くの数量で詳細に実施し、仕上げ材の塗厚のばらつき、中性化の傾向と鉄筋腐食の状態などの部位別・方位別の実態について把握した。

第 4 章では、実建築物を取り巻く環境条件がコンクリートの中性化に及ぼす影響を定量的に評価するために、実建築物 1210 棟の基礎立上り部の打放しコンクリート部分から計 1210 本のコア供試体を採取して圧縮強度および中性化深さを調査するとともに、実建築物の躯体表面における温度・相対湿度の実測を行った。その結果、建築物の屋外と床下では中性化の進行が異なり、床下の中性化速度係数の方が大きいことを明らかにした。また、建築物の各面の方位によって中性化の進行が異なり、南面>西面>東面>北面の順で中性化速度係数が大きいことを明らかにした。これは部位や方位によって躯体表面における温度・湿度に差異があることに起因する。実測した温度および相対湿度を用いて算出した補正係数を導入することで、異なる温度・湿度環境にあるコンクリートの中性化速度係数を適切に評価できることを示した。

第 5 章では、大気中の約 100 倍の  $\text{CO}_2$  濃度で行った促進中性化試験の結果を利用して、実建築物における中性化の進行を予測する手法の検討を行った。まず、既往の研究論文で発表された促進中性化試験データを収集・整理し、総括的に圧縮強度と中性化速度係数の関係を定式化した。続いて、実建築物から採取したコア供試体の圧縮強度と中性化速度係数の関係を定式化した。さらに、促進中性化試験、実建築物調査のそれぞれの圧縮強度と中性化速度係数の関係式を対応させることで中性化速度係数比を提案した。この中性化速度係数比を利用することで、促進中性化試験結果から実建築物におけるコンクリートの中性化深さを予測することができる。

第 6 章では、実建築物におけるコンクリートの中性化に仕上げ材が及ぼす影響を定量的に評価するため、実建築物 100 棟の外壁でモルタル仕上げが施されたコンクリート部分から計 200 本のコア供試体を採取して圧縮強度、中性化深さ、モルタル仕上げの塗厚を調査した。その調査結果をもとに、コンクリートの圧縮強度、モルタル仕上げの塗厚、中性化速度係数の関係について検



討した。その結果、モルタル仕上げは自身が中性化することでコンクリートの中性化進行を遅らせる効果があり、いわゆるコンクリートの中性化抵抗となり得ることを明らかにした。また、第4章における打放しコンクリートの場合と同様に、モルタル仕上げ材が施されたコンクリートについても方位によって中性化の進行が異なり、温度および相対湿度を指標とすることで、各方位面の中性化速度係数を適切に評価できることを示した。

第7章では、第4章から第6章で提案した予測・評価手法を包括的に体系化した建築物の劣化評価手法を提案し、その適用性および妥当性を検証した。すなわち、ケーススタディとして第3章で調査対象とした特定の実建築物の打放しコンクリートおよびモルタル仕上げ材が施されたコンクリートの各方位面の中性化速度係数を対象に実測調査および予測計算を行い、それらを比較検討した。その結果、提案した方法により、概ね実建築物の中性化進行を予測・評価できることが確認できた。

第8章では、本研究で得られた知見をまとめた。

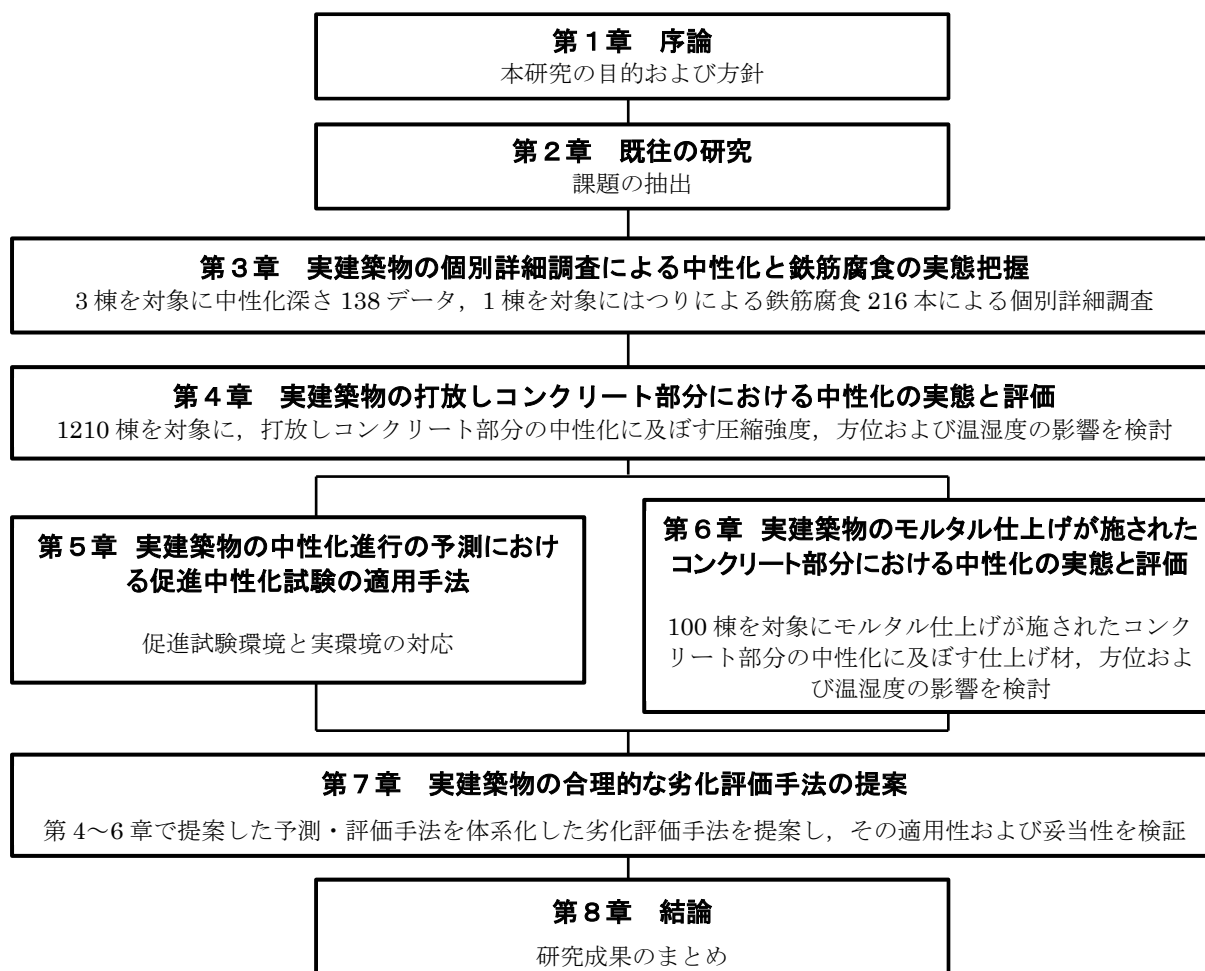


図 1.3-1 本論文の構成フロー

## 参考文献

- 1-1) 国土交通省：公営住宅等長寿命化計画策定指針（改定），2016.8
- 1-2) 都市再生機構：UR 賃貸住宅の長寿命化に関する計画，2014.4
- 1-3) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事，2013
- 1-4) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計施工指針・同解説，2016
- 1-5) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の耐久性調査・診断および補修指針（案）・同解説，1997
- 1-6) 建築研究所，住宅リフォーム・紛争処理支援センター：既存マンション躯体の劣化度調査・診断技術マニュアル，2002
- 1-7) 向井毅：仕上げによるコンクリート構造物の耐久性ならびに美観の向上，コンクリート工学，vol.27，No.2，pp.20-29，1989.2
- 1-8) 川西泰一郎ほか 2 名：実建物調査に基づくコンクリートの中性化進行に関する分析，日本建築学会構造系論文集，第 608 号，pp.9-14，2006.10
- 1-9) 玉井孝幸ほか 4 名：1953 年から 1985 に建設された建物の構造体コンクリートの中性化の実態，日本建築学会技術報告集，vol.13，No.25，pp.1-6，2007.6
- 1-10) 春畑仁一ほか 2 名：既存鉄筋コンクリート造建築物のコンクリート材料調査における圧縮強度と中性化深さの統計，その 1，その 2，日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1，pp.549-552，2011.8

## 第2章 既往の研究

### 2.1 はじめに

本章では、実建築物のコンクリートの中性化に及ぼす各種要因のうち、実建築物で調査し、その種類や物性値などの諸元を明らかにすることが比較的可能な要因を抽出し、既往の文献調査を行った。具体的には、コンクリートの圧縮強度、仕上げ材、方位、温度・湿度である。

実建築物の劣化調査において、コンクリートの中性化深さを測定する場合、コア採取による調査、はつりによる調査、ドリルによる調査などが行われる。通常は、中性化深さの測定と併せて、コンクリートの圧縮強度を確認する試験が行われ、供用中の実建築物のコンクリートそのものの性能および品質を示す代表値として評価されている。仕上げ材については、それ自身の劣化が問題になる場合には、仕上げの種類や劣化状況が目視確認されるが、コンクリートの中性化抑制効果を有しているため、コンクリートの中性化の進行を分析する場合においても、仕上げ材の種類や状態が併せて記録されることが多い。方位、温度・湿度については、中性化に及ぼす環境条件による要因であるが、実務的な調査で測定されることは稀である。

### 2.2 中性化に及ぼす各種要因

#### 2.2.1 圧縮強度

コンクリートの圧縮強度と中性化の進行の関係については、促進中性化試験、供試体や実大部材による屋外暴露試験、実建築物におけるコア採取による調査などによってこれまで多くの研究がされ、圧縮強度と中性化速度は相関性が高いことが報告されている。

##### (1) 促進中性化試験

実環境下におけるコンクリートの中性化の進行は、かなりの期間を要する。促進中性化試験は、一般に高濃度の炭酸ガス槽内にてコンクリート供試体を中性化させることで、短期間で中性化を進行させる方法である。

促進中性化試験の結果に基づき、コンクリートの圧縮強度と中性化速度の関係が各種提案されているが、図 2.2.1-1 に示すようなコンクリートの圧縮強度に反比例するという和泉ら<sup>2-1)</sup>の研究に基づいた式 (2.2.1-1) や、図 2.2.1-2 に示すようなコンクリートの圧縮強度の平方根に反比例するという馬場ら<sup>2-2)</sup>の研究に基づいた式 (2.2.1-2) などが代表的なものとして挙げられる。

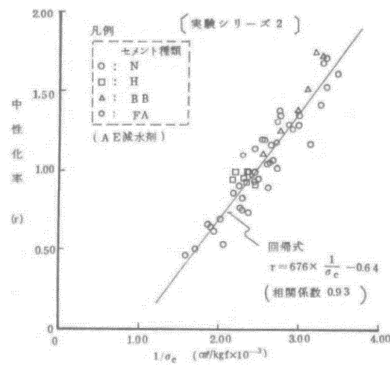


図 2.2.1-1 圧縮強度の逆数と中性化速度の関係<sup>2-1)</sup>

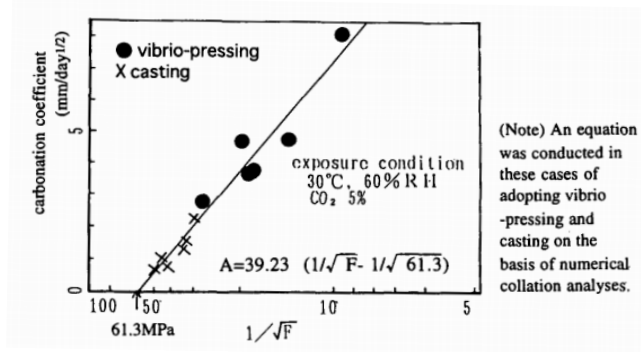


図 2.2.1-2 圧縮強度の逆数の平方根と中性化速度の関係<sup>2-2)</sup>

$$A=a(1/\sigma_c - b) \quad (2.2.1-1)$$

$$A=a(1/\sqrt{\sigma_c} - b) \quad (2.2.1-2)$$

ここで、A：コンクリートの中性化速度係数

$\sigma_c$ ：コンクリートの圧縮強度

a, b：定数，とする。

和泉ら<sup>2-1)</sup>の研究から、セメントの種類、水セメント比および養生条件に関わらず、それらの影響を全て包含した結果と考えられる圧縮強度を指標とすれば中性化速度を評価できるものとして、日本建築学会 JASS5 では所要の耐久性をコンクリートの圧縮強度で表す方法<sup>2-3)</sup>を採用している。

促進中性化試験そのものは各研究機関によって個々の研究ごとに独自の促進試験条件によって行われてきた経緯があり、試験方法が統一されたのは、阿部らの研究<sup>2-4)</sup>を踏まえて、1991年の日本建築学会「高耐久性鉄筋コンクリート造設計施工指針(案)・同解説」<sup>2-5)</sup>における「コンクリートの促進中性化試験方法(案)」を経て、2003年に JIS 化されて以降である。JIS A 1153「コンクリートの促進中性化試験方法」では、試験体寸法 100×100×400 mm，温度 20±2℃，相対湿度 60±5%，CO<sub>2</sub> 濃度 5±0.2%を試験条件として定めており、これに準拠として、材料や調合の違いなどが中性化抵抗に及ぼす影響を確認するための試験が多く行われてきている。

しかし、試験方法が統一化された以降も、限定された個々の研究成果の報告に留まっており、コンクリートの圧縮強度と中性化速度の関係について総括的に検討されたものはない。また、促

進中性化試験の結果で得られた中性化速度が、実環境での長期に渡る中性化の進行の何倍の状態に相当するかに関して明確に記述した研究は少ない。通常、促進中性化試験結果を用いて実環境に相当する中性化速度係数を算出する場合の方法は、両環境における CO<sub>2</sub> 濃度と中性化期間の積である CO<sub>2</sub> 積算量 (%年) が同一になった時、両環境の中性化深さが同じになるという考え方に基づいて単純に CO<sub>2</sub> 濃度の換算による評価によっており、日本建築学会「鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計施工指針・同解説」では、促進中性化試験における CO<sub>2</sub> 濃度 5.0% に対する実環境の CO<sub>2</sub> 濃度の比の平方根に比例するものとして、式 (2.2.1-3) が示されている。

$$R_1 = \sqrt{CO_2 / 5.0} \quad (2.2.1-3)$$

ここで、 $R_1$  : CO<sub>2</sub> 濃度による中性化速度への影響係数

(=促進中性化試験による中性化速度係数との比, に相当)

CO<sub>2</sub> : CO<sub>2</sub> 濃度 (%), とする。

実環境における屋外の CO<sub>2</sub> 濃度を 0.05% とすれば、実環境における中性化速度係数と促進中性化試験による中性化速度係数の比は 0.1 になる。一方、促進中性化試験と長期屋外暴露試験結果との対応を直接的に検討したものとしては、押田ら<sup>2-6)</sup>による研究など僅かである。押田ら<sup>2-6)</sup>の研究では、実環境での 7 年間における供試体の暴露試験の結果から求めた中性化速度係数と促進中性化試験による中性化速度係数の比は、屋外環境で 0.06~0.13, 屋内環境で 0.18~0.30 であり、水結合材比が小さくなると大きくなる傾向にあったことが報告されている。また、依田ら<sup>2-7)</sup>による研究では、温度 20℃, 湿度 80%, CO<sub>2</sub> 濃度 10% の条件で促進試験を行った場合に屋外自然暴露の約 40 倍の促進, 温度 20℃, 湿度 40%, CO<sub>2</sub> 濃度 10% の条件で促進試験を行った場合に屋外自然暴露の約 145 倍の促進になることが報告されている。

## (2) 屋外暴露試験

屋外暴露試験では、長谷川らは関連する既往の文献調査<sup>2-8)</sup>を行い、標準養生供試体における 28 日圧縮強度と屋外暴露試験の結果から求めた中性化速度係数の関係を図 2.2.1-3 に、その関係を表す回帰式として、式 (2.2.1-2) に基づいた式 (2.2.1-4) で示している。この調査から得られた知見として、屋外暴露試験による中性化深さの平均的な値に対して、標準的な条件における既往の実験式(岸谷式<sup>2-9)</sup>, 和泉式<sup>2-10)</sup>, 依田式<sup>2-11)</sup>, 土木学会式<sup>2-12)</sup>) は安全側の評価となること、圧縮強度約 60N/mm<sup>2</sup> で中性化速度係数が 0 近くになることなどが報告されている。

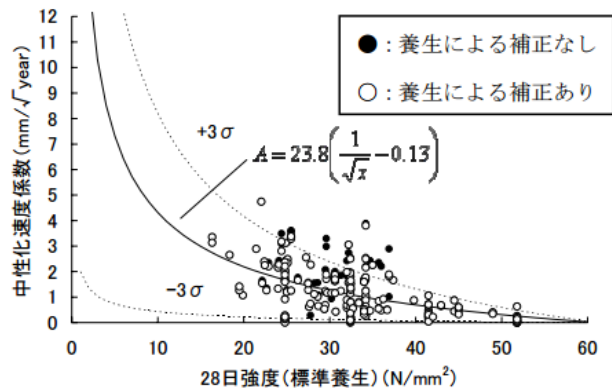


図 2.2.1-3 28 日圧縮強度と中性化速度係数の関係<sup>2-8)</sup>

$$A=23.8(1/\sqrt{\sigma_{C28}}-0.11) \quad (2.2.1-4)$$

ここで、A：屋外暴露試験による中性化速度係数 (mm/√年)

$\sigma_{C28}$ ：標準養生供試体における 28 日圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)，とする。

軽量コンクリートと普通コンクリートによる比較としては、大久保らの円柱供試体による 33 年間の暴露試験の報告<sup>2-13)</sup>がある。図 2.2.1-4 に示すように、同一の圧縮強度に対する中性化深さは、おおむね、軽量 2 種<軽量 1 種<普通コンクリートの順となっている。この理由として、吸水・放水試験時の含水量が概ね、軽量 2 種>軽量 1 種>普通コンクリートの順となっており、中性化深さの順序と反対の傾向を示していることから、試験体中の含水量が中性化の進行に影響を及ぼしていることを挙げている。

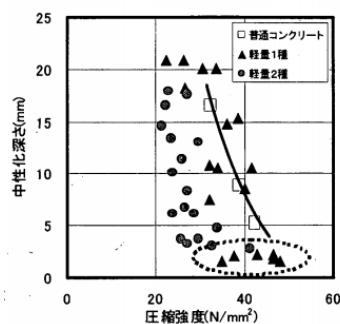


図 2.2.1-4 軽量コンクリートおよび普通コンクリートと中性化速度係数の関係<sup>2-13)</sup>

同一圧縮強度でも含水率によって中性化深さが異なることから、コンクリートの圧縮強度と中性化速度係数は直接的な因果関係にあるのではないことが示唆される。すなわち、コンクリート

内における CO<sub>2</sub> の拡散速度は、直接的にはコンクリート組織が粗であるか密であるか、空隙が多いか少ないかによって影響を受けるものであり、コンクリートの圧縮強度との関係はそのコンクリート組織の状態を介しての二次的な相関を有しているに過ぎないと考えられる。

設計基準強度 60N/mm<sup>2</sup> 以上の高強度コンクリートについては、1988 年から 5 年に渡って実施された建設省総合技術開発プロジェクト「鉄筋コンクリート造建築物の超軽量・超高層化技術の開発」以降に普及した材料であるため、長期性状に関するデータについてはまだ少ない。杉山らは、Fc60 および Fc100 のコンクリートを使用し、その実強度が 70 N/mm<sup>2</sup> を超える実大柱による暴露試験<sup>2-14)</sup>において、材齢 15 年では中性化深さが 0 mmであることを報告している。ただし、これはフェノールフタレイン試験による方法では中性化と判定される pH 値ではなかったことによるもので、X 線回折分析による場合ではわずかに中性化が進行していることが確認された。

また、材齢による圧縮強度の違いが中性化速度係数との相関性に及ぼす傾向を研究した例では、玉井らによる材齢 15 年の実大壁の暴露試験<sup>2-15)</sup>がある。図 2.2.1-5 に示すように、中性化速度係数と最も相関の高かったのは標準養生 28 日強度であり、コア強度との相関は明確でなかったと報告している。これは、コア強度の差は高さ方向の違いに起因するものであり、その違いが中性化速度係数に与える影響は小さかったためとしている。

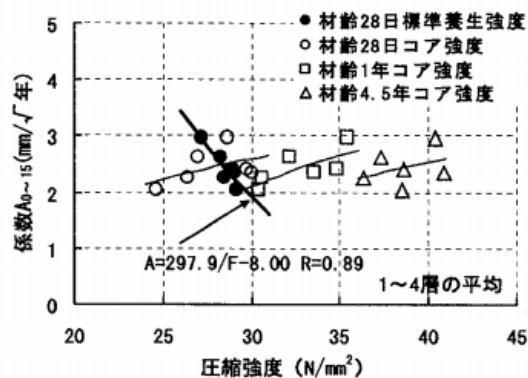


図 2.2.1-5 各圧縮強度と材齢 15 年の実大壁における中性化速度係数の関係<sup>2-15)</sup>

### (3) 実建築物

実環境における実建築物の圧縮強度と中性化の進行の実態を把握するには、比較的長い期間が経過した構造体からコンクリートコアを実際に採取し、圧縮強度と中性化深さを測定しなければならない。建築物単体についての事例報告は多くあるが、多くの棟数の実建築物から採取したコアデータに基づき総括的な検討を行っている事例としては、和泉ら<sup>2-16)</sup>、川西ら<sup>2-17)</sup>、玉井ら<sup>2-18)</sup>、春畑ら<sup>2-19)</sup>の調査結果などに限られている。

和泉らによる調査のうち屋内・仕上げ無しの調査結果を図 2.2.1-6 に、川西らによる調査のうち屋外・仕上げ無しの調査結果を図 2.2.1-7 に、玉井らによる調査のうち屋外・仕上げ無しの調査結果を図 2.2.1-8 に、春畑らによる調査のうち屋内外・仕上げ無しの調査結果を図 2.2.1-9 に示す。ここで、図 2.2.1-6 のみ建築物ごとに全コアの平均圧縮強度と平均中性化深さの関係がプロットされており、図 2.2.1-7～2.2.1-9 ではコアごとの圧縮強度と中性化速度係数の関係がプロットされている。和泉らは、圧縮強度が小さくなるに従い、中性化速度係数は大きくなりかつばらつきも大きくなる傾向にあると述べている。川西らは、屋外・仕上げ無しにおける圧縮強度と中性化速度係数の関係を式 (2.2.1-1) によって、 $A=160.2/\sigma_c-1.37$ 、と表している。玉井らの屋外・仕上げ無しによる調査結果は、データ数が少なく、またほとんど中性化が進行していないデータが半数以上を占めたために、圧縮強度と中性化速度係数の相関が明確に出ていない。春畑らは、標準養生 28 日強度と屋外暴露試験による中性化速度係数の関係式 (2.2.1-4) と比較して、実建築物のコアにおける同一強度の中性化速度係数は 2 倍程度大きいことを述べている。

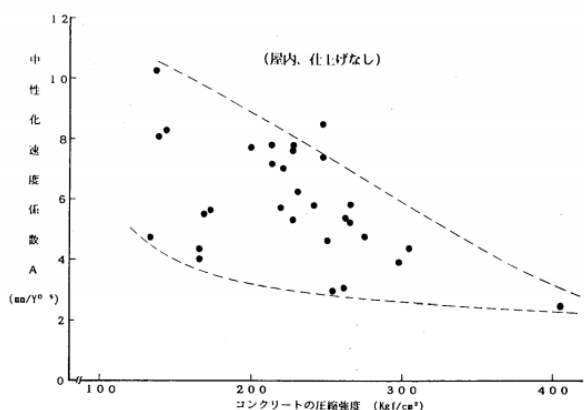


図 2.2.1-6 屋内・仕上げ無しの圧縮強度と中性化速度係数の関係<sup>2-16)</sup>

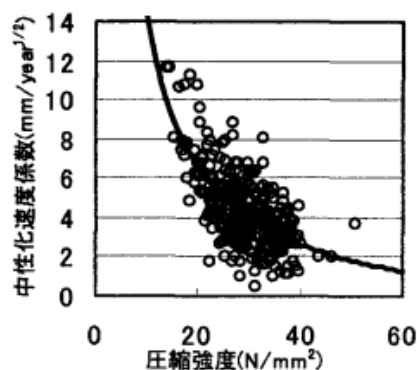


図 2.2.1-7 屋外・仕上げ無しの圧縮強度と中性化速度係数の関係<sup>2-17)</sup>



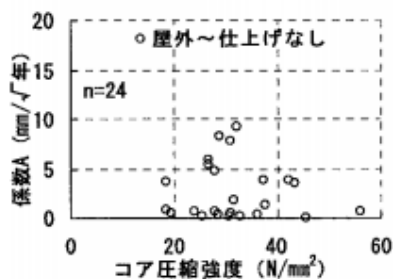


図 2.2.1-8 屋外・仕上げ無しの圧縮強度と中性化速度係数の関係<sup>2-18)</sup>

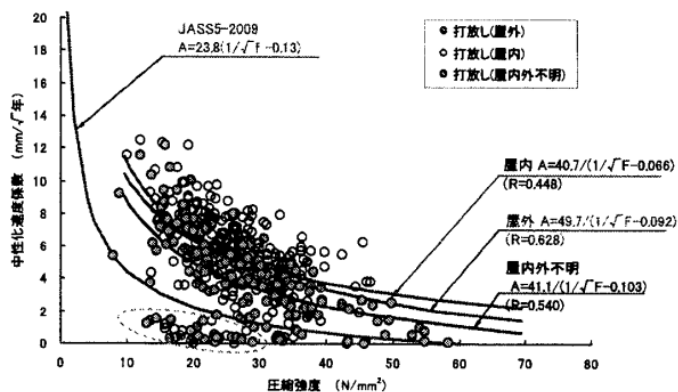


図 2.2.1-9 屋内外・仕上げ無しの圧縮強度と中性化速度係数の関係<sup>2-19)</sup>

多くの数の実建築物を包括した調査においては、もともと使用材料に違いがあることに加えて、施工条件や施工品質、環境条件などに違いがあるため、圧縮強度と中性化速度係数の関係に大きなばらつきが見られると考えられる。

## 2.2.2 仕上げ材

コンクリートの中性化の進行に対して、仕上げ材による中性化抑制効果があることは以前から知られているところである<sup>2-20)</sup>。仕上げ材が施されたコンクリートの中性化進行予測については、馬場ら<sup>2-21)</sup>による等価時間則に基づいたモデル、福島ら<sup>2-22)</sup>や兼松ら<sup>2-23)</sup>による非定常拡散モデル、李ら<sup>2-24)</sup>による擬似定常拡散モデルが挙げられる。

各種仕上げ材による中性化抑制効果について、促進中性化試験で確認した例では、本橋ら<sup>2-25)</sup>、河野ら<sup>2-26)</sup>、長谷川ら<sup>2-27)</sup>、近年では国土交通省による平成 22～24 年度建築基準整備促進事業「コンクリート造建築物の劣化対策に関する基準の整備に資する検討」<sup>2-28)～2-30)</sup>および平成 27 年度建築基準整備促進事業「仕上材を施した既存鉄筋コンクリート造建築物の鉄筋腐食抑制に関する評価方法の検討」<sup>2-31)</sup>による一連の報告、また、屋外暴露試験によるものでは、長谷川らによる暴露期間 10 年超の報告例<sup>2-32)</sup>がある。

実建築物では、前述の和泉ら<sup>2-16)</sup>、川西ら<sup>2-17)</sup>、玉井ら<sup>2-18)</sup>、春畑ら<sup>2-19)</sup>のように、コア採取による調査において、フェノールフタレイン試験によって測定した仕上げ材の種類ごとのコンクリートの中性化速度係数が報告されているほか、唐沢らのようにトレント法により透気係数を測定

し、理論的手法によって求めた仕上げ材の経年劣化による影響を考慮した中性化抵抗の予測値と比較検証した研究<sup>2-33)</sup>もある。

一般に、各種仕上げ材料の中性化抑制効果は、実データをいわゆる $\sqrt{t}$ 則の式による中性化予測式によって近似し、仕上げ無し（打放し）に対する中性化速度係数の比（＝中性化率）として比較されることが多い。しかし、モルタルなどセメント系材料はそれ自体が中性化することでコンクリート本体の中性化を遅らせる効果があると考えられており<sup>2-22)</sup>、モルタルについてはこの中性化速度係数を用いて直接評価してもばらつきが大きいことが指摘されている。

実構造物の調査結果の例として、コンクリートの表面にモルタル仕上げが施されている場合のモルタルの中性化に対する効果を図 2.2.2-1<sup>2-17)</sup>、図 2.2.2-2<sup>2-18)</sup>、図 2.2.2-3<sup>2-19)</sup>に示す。川西らの調査ではモルタル仕上げの上にリシン吹付けの平均値が 1.81 mm/ $\sqrt{\text{年}}$ で変動係数は 90%，中村らの調査では、屋内外の区別がなくモルタル仕上げの上に何らかの化粧塗材が施された場合の平均値が 1.02 mm/ $\sqrt{\text{年}}$ で変動係数は 132%，玉井らの調査では屋外におけるモルタル仕上げの平均値が 0.77 mm/ $\sqrt{\text{年}}$ で変動係数は 122%であり、調査によって平均値の値に差があり、ばらつきも大きい結果となっている。

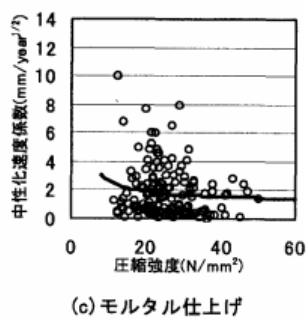


図 2.2.2-1 モルタル仕上げが施されたコンクリートの中性化速度係数<sup>2-17)</sup>

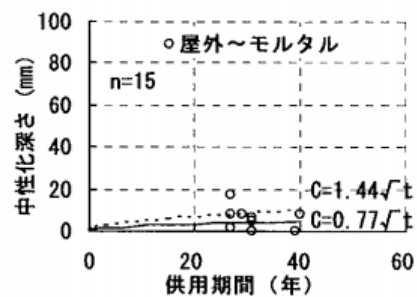


図 2.2.2-2 モルタル仕上げが施されたコンクリートの中性化速度係数<sup>2-18)</sup>

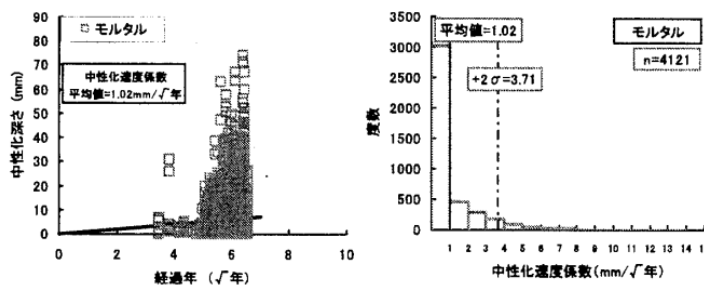


図 2.2.2-3 モルタル仕上げが施されたコンクリートの中性化速度係数<sup>2-19)</sup>

### 2.2.3 方位

屋外暴露試験における供試体や実建築物から採取したコアにより中性化深さを測定したときの環境条件として、測定面の方位まで示されている調査報告は少ない。しかし、方位によって構造体コンクリートが受ける日射量には差があることから、コンクリート表面および内部における温度・湿度や乾燥状態にも程度の違いはあれどある程度の影響を及ぼしているものと考えられ、中性化速度も方位によって差異があることが想定される。

屋外暴露試験の例では、平屋建築物の南側と北側に角柱供試体を配置し、材齢 25 年における中性化速度係数を比較した齊藤らの報告<sup>2-34)</sup>がある。それによれば、図 2.2.3-1<sup>2-34)</sup>に示すように、中性化速度係数は北側より南側の方が大きく、その要因として北側の暴露場所は、建築物の影となり降雨によって濡れた後、供試体に日があたらず南側に比べ乾燥しにくい条件となっているためと考察がされている。

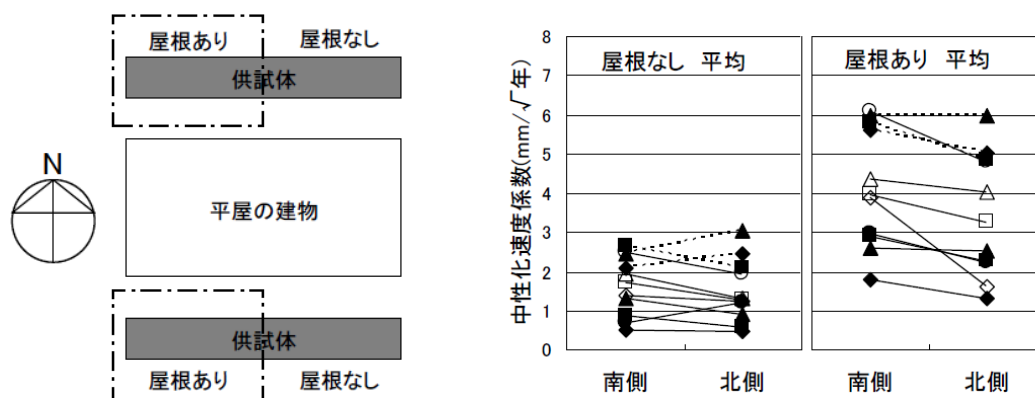


図 2.2.3-1 供試体の配置図と暴露場所による中性化速度係数の比較<sup>2-34)</sup>

実建築物において中性化深さを方位別に検討した事例としては、打放し（仕上げなし）のコンクリートで嵩ら<sup>2-35)</sup>と和泉ら<sup>2-16)</sup>、並木らの調査<sup>2-36)</sup>がある。嵩らと和泉らの調査では、図 2.2.3-2<sup>2-16)</sup>に示すように、同一建築物の屋外で雨がかりとなる箇所における東面、西面および北面のそれぞれの平均中性化深さと南面の平均中性化深さの比率を求め、それらの平均値と標準偏差を算出している。それによれば、南面の中性化深さに対する倍率は、東面で 0.77 倍、西面で 0.94 倍、北面で 0.69 倍であり、中性化深さは南面>西面>東面>北面の順で大きく、その理由として雨がかり箇所では日射量が多い面ほどコンクリートが乾燥することを挙げている。一方、並木らの調

査では築 34 年の RC 造校舎について、東西南北の方位別に壁面を水平方向に 5cm 間隔ではついで中性化深さを詳細に実測している。図 2.2.3-3<sup>2-36)</sup>に示すように、5cm の測定間隔でも中性化深さには比較的大きなばらつきが見られるが、平均値としては南面が他方位に比べて大きい傾向が表れている。

一方で、仕上げ材がある場合<sup>例えば、2-37)~2-39)</sup>においては、図 2.2.3-4~2.2.3-6 に示すように建築物棟数やデータ数も限定的であり、また方位による影響が明確ではないなど詳細な検討がされていない。方位の違いによる中性化への影響について、中性化深さの測定結果を東西南北に分類して中性化速度係数を求めただけでは、明らかにされていない部分がある。

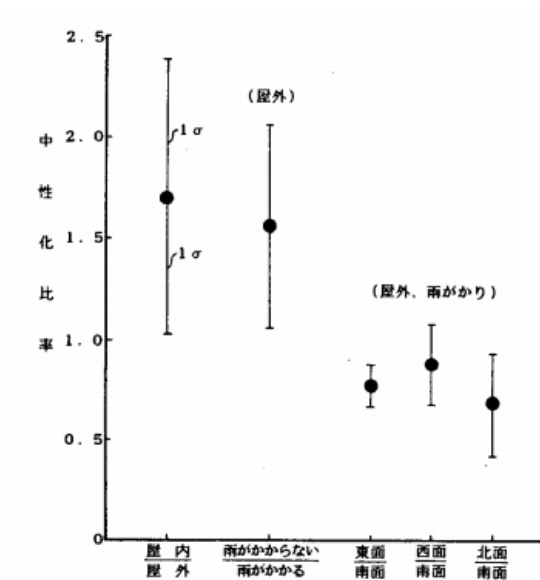


図 2.2.3-2 環境条件が中性化深さの進行に及ぼす影響<sup>2-16)</sup>

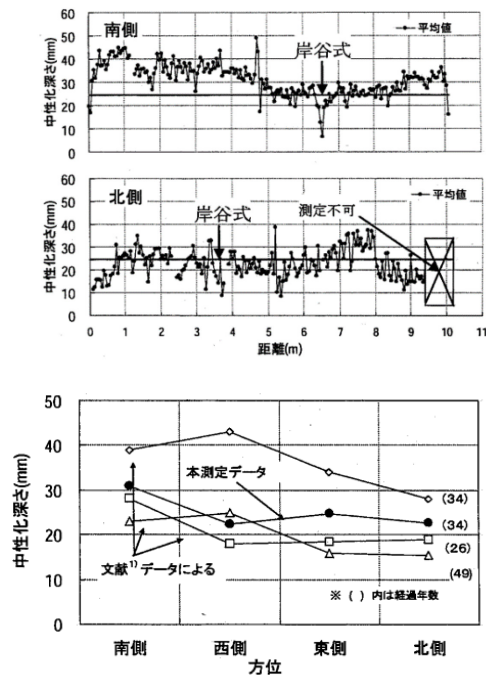


図 2.2.3-3 方位別中性化深さの比較<sup>2-36)</sup>

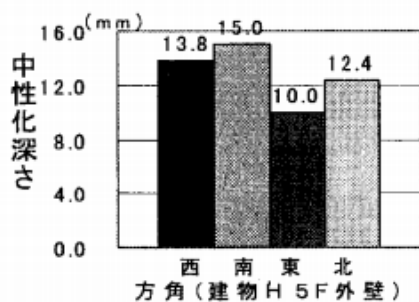


図 2.2.3-4 方位別中性化深さの比較<sup>2-37)</sup>

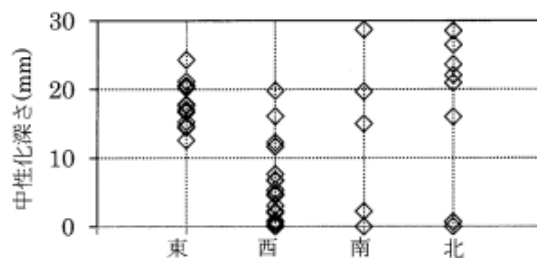


図 2.2.3-5 方位別中性化深さの比較<sup>2-38)</sup>

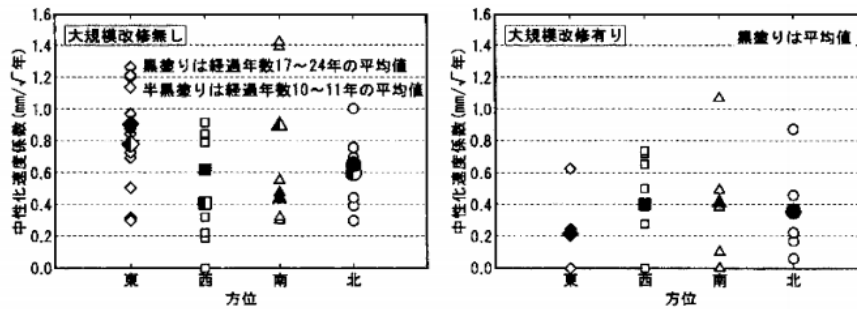


図 2.2.3-6 方位別の中性化速度係数の比較<sup>2-39)</sup>

#### 2.2.4 温度・湿度

中性化速度に及ぼす温度・湿度の影響に関する研究のほとんどが促進中性化試験によるものである。阿部ら<sup>2-4)</sup>は、温度が及ぼす影響については図 2.2.4-1 に、相対湿度が及ぼす影響については図 2.2.4-2 に示すような試験結果を得ており、これに基づき中性化速度に及ぼす温度および湿度の影響係数として式(2.2.4-1)および式(2.2.4-2)を提案している。

$$\beta_1 = (T + 27.3) / 47.3 \quad (2.2.4-1)$$

ここで、 $\beta_1$ ：中性化深さに関する温度の影響係数

$T$ ：温度 (°C)，とする。

$$\beta_2 = H_u(100 - H_u)(140 - H_u) / 192000 \quad (2.2.4-2)$$

ここで、 $\beta_2$ ：中性化深さに関する相対湿度の影響係数

$H_u$ ：相対湿度 (%)，とする。

式(2.2.4-1)は、コンクリートの促進中性化試験の結果に基づき定められた、温度 20°C の場合に対する中性化速度係数の比として算出される影響係数である。式(2.2.4-2)は、コンクリートの促進中性化試験の結果に基づき定められた、相対湿度 60% の場合に対する中性化速度係数の比として算出される影響係数である。40% のときに最大になり、それより大きくても小さくても係数は小さくなる。

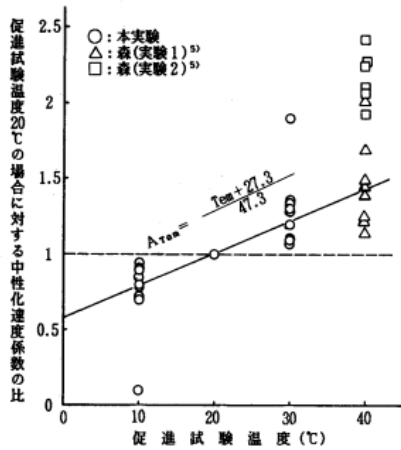


図 2.2.4-1 中性化に及ぼす促進  
試験温度の影響<sup>2-4)</sup>

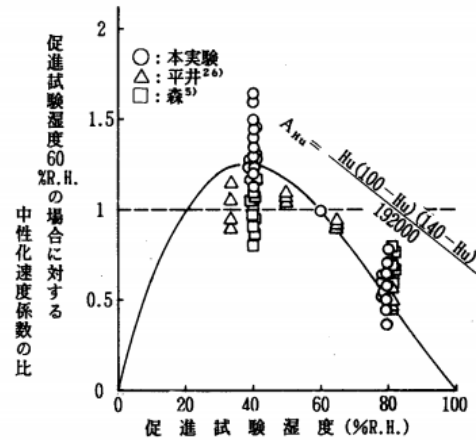


図 2.2.4-2 中性化に及ぼす促進  
試験湿度の影響<sup>2-4)</sup>

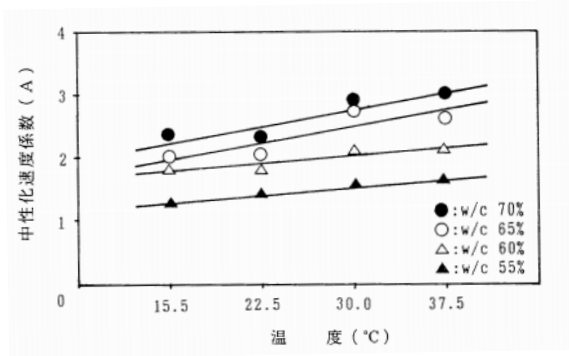


図 2.2.4-3 中性化に及ぼす促進  
試験温度の影響<sup>2-40)</sup>

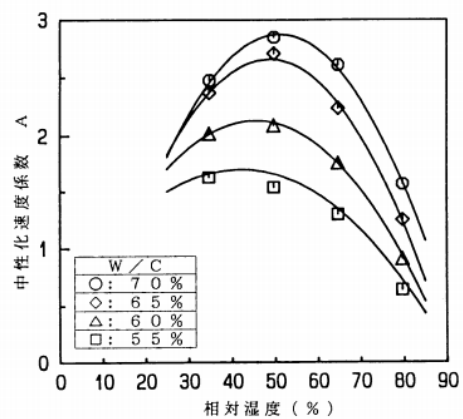


図 2.2.4-4 中性化に及ぼす促進  
試験湿度の影響<sup>2-40)</sup>

他にも、鄭ら<sup>2-40)</sup>は一定の CO<sub>2</sub> 濃度で温度・湿度の異なる条件下で、W/C=65%のモルタル試験体の促進中性化試験を行い、温度が及ぼす影響については図 2.2.4-3 に、相対湿度が及ぼす影響については図 2.2.4-4 に示すような試験結果を得ており、中性化速度係数を温度と湿度の関数で表す実験式として、式(2.2.4-3)を提案している。

$$A = -0.001478H^2 + 0.144H + 0.0351T - 1.9853 \quad (2.2.4-3)$$

ここで、 $A$ : 中性化速度係数

$H$ : 相対湿度 (%)

$T$ : 温度 (°C), とする。

一方、実建築物のコンクリート壁の表面やその内部における温度および相対湿度を実測した報告例としては、実験棟（千葉県野田市）における東西南北各方位の壁の表面および内部で 20 日間計測した鵜木らのデータ<sup>2-41)</sup>や集合住宅（東京都足立区）における南面および室内の壁内部で 2 ヶ月間計測した木野瀬らのデータ<sup>2-42)</sup>など限定的なものである。

鵜木らが測定したコンクリート壁内部の温度・相対湿度を図 2.2.4-5 に、方位別の中性化深さを表 2.2.4-1 に、中性化深さと内部温度および内部相対湿度との各関係を図 2.2.4-6 および図 2.2.4-7 に示す。それらによれば、コンクリート内部の温度と中性化深さのとの関係は、内部温度が高くなるにつれて中性化深さも高くなっている。方位別では、内部温度が高かった南側が最も平均中性化深さが大きい傾向が見られている。また、コンクリート内部の湿度との関係は、コンクリート内部の湿度が低くなるにつれて中性化深さが大きくなるという傾向を示している。

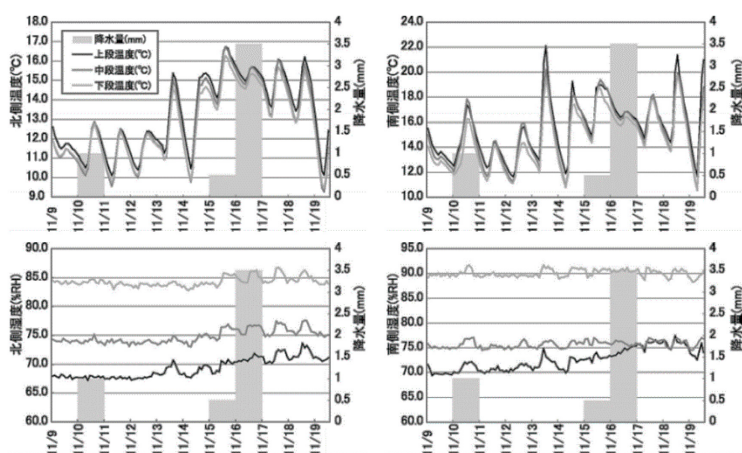


図 2.2.4-5 温度・相対湿度の測定結果および降水量<sup>2-41)</sup>

表 2.2.4-1 中性化深さ測定結果<sup>2-41)</sup>

中性化深さ (mm)	east	west	south	north	平均	
実測値	内部1(上)	20	15	28	24	24.5
	内部2(上)	23	20	28	26	
	内部3(上)	32	30	28	20	
	内部4(中)	9	12	18	17	17.7
	内部5(中)	20	17	28	12	
	内部6(中)	22	12	27	18	
	内部7(下)	2	3	20	13	13.8
	内部8(下)	10	18	15	28	
	内部9(下)	4	15	26	11	
内部温度平均	15.8	15.8	24.2	18.8	18.65	
理論値	表面温度	13.98	11.75	11.35	9.38	11.62
野田市温度	11.34					

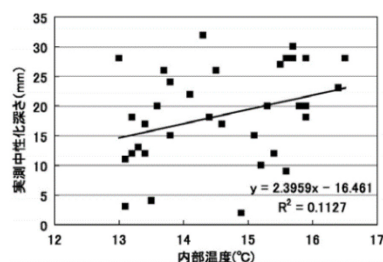


図 2.2.4-6 内部温度と実測中性化深さの関係<sup>2-41)</sup>

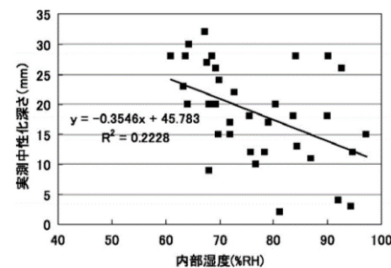


図 2.2.4-7 内部湿度と実測中性化深さの関係<sup>2-41)</sup>

木野瀬らが測定したコンクリート壁内部の温度・相対湿度を図 2.2.4-8 に、中性化深さを表 2.2.4-2 に示す。それらによれば、雨がかりとなる屋外南面と雨がかりとならない屋内では、平均温度の差は少ないが、平均相対湿度は屋外南面の方が 20～30%程度高く、中性化深さについては屋内側の方が 10～30 mm程度深くなっている。実建築物の中性化速度に及ぼす影響として、温度と湿度では、湿度の差異に依存していることが伺える。

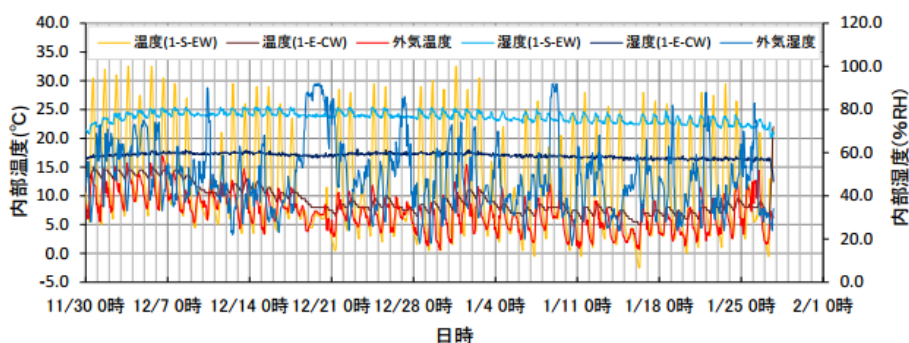


図 2.2.4-8 温度・相対湿度の測定結果<sup>2-42)</sup>

表 2.2.4-2 中性化深さなどの測定結果<sup>2-42)</sup>

調査記号	屋内・屋外	仕上げ		鉄筋		中性化深さ mm	かぶり厚に対する 中性化の割合 %	鉄筋位置に おける含水率 %	環境条件	
		仕上げ種別	仕上げ厚 mm	腐食 グレード	かぶり厚 mm				平均内部温度 °C	平衡内部湿度 %RH
1-E-CW	内	打ち放し	-	I	52	61.9	119.1	1.96	9.4	58.6
2-E-CW	内	打ち放し	-	I	40	81.6	204.0	1.07	10.2	48.7
3-E-CW	内	打ち放し	-	I	54	55.4	102.5	1.02	10.4	44.4
4-E-CW	内	打ち放し	-	II	42	61.2	145.8	1.01	9.3	46.9
5-E-CW	内	打ち放し	-	II	58	62.5	107.8	0.82	機器故障により測定不可	
1-S-EW-7	外	吹付材・モルタル	15	III	20	53.2	265.8	-	11.4	76.5



### 2.3 まとめ

本章では、実建築物のコンクリートの中性化に及ぼす各種要因のうち、コンクリートの圧縮強度、仕上げ材、方位、温度・湿度に関する既往の文献調査を行った。

中性化に関する研究そのものはこれまで非常に多く行われているが、ここで抽出した課題を以下に示す。

- (1) 促進中性化試験は各研究機関で行われてきているが、コンクリートの圧縮強度と中性化速度の関係について、総括的に検討されたものはない。また、促進中性化試験の結果で得られた中性化速度が、実環境での長期に渡る中性化の進行の何倍の状態に相当するかに関して明確に記述した研究は少ない。
- (2) モルタル仕上げなどその材料自体が中性化することでコンクリート本体の中性化を遅らせる効果がある仕上げ材料が用いられている場合には、コンクリートの中性化抑制効果に関して、中性化深さの実データをいわゆる $\sqrt{t}$ 則の式による中性化予測式によって近似し、仕上げ無し（打放し）に対する中性化速度係数の比（＝中性化率）として評価してもばらつきが大きい。
- (3) 多くの棟数の実建築物から採取したコアデータに基づき総括的な検討を行っている事例は限られており、代表的なもので4件である。これらの先行研究において、方位の違いによる中性化への影響について分析した事例は1件である。方位に着目して調査結果を分析した事例の多くは、単独の建築物についてであり、統計的に評価がされていない。
- (4) 方位による環境条件の違いを、日射量、実測温度、実測湿度などの指標による具体の物理量に基づいて表し、それらの因子が中性化速度に及ぼす影響について定量的に関連づけた研究は、限定的である。また、方位の影響に加えて、仕上げ材部分の中性化抑制効果を含めた包括的な研究は皆無である。

## 参考文献

- 2-1) 和泉意登志：コンクリートの中性化に及ぼすセメントの種類，調合および養生条件の影響について，第7回コンクリート工学年次講演会論文集， pp.117-120， 1985
- 2-2) 馬場明生ほか3名：グラウトしたコンクリートメーソソナーの中性化，日本建築学会構造系論文報告集，第498号， pp.1-6， 1997.8
- 2-3) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事 2015
- 2-4) 阿部道彦ほか5名：コンクリートの促進中性化試験法の評価に関する研究，日本建築学会構造系論文報告集，第409号， pp.1-10， 1990.3
- 2-5) 日本建築学会：高耐久性鉄筋コンクリート造設計施工指針（案）・同解説， 1991.7
- 2-6) 押田文雄ほか5名：中庸熟フライアッシュセメントを使用したコンクリートの中性化速度係数，日本建築学会技術報告集，Vol.20， No.45， pp.451-456， 2014.6
- 2-7) 依田彰彦：鋼材の腐食と対策，コンクリートの中性化，コンクリート工学，Vol.15， No.9， pp.34-36， 1987
- 2-8) 長谷川拓哉ほか1名：文献調査に基づく屋外の中性化進行予測，コンクリート工学年次論文集，vol.28， No.1， pp.665-670， 2006
- 2-9) 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， pp.149-153， 1963.2
- 2-10) 和泉意登志：コンクリート構造物の耐久性上の問題点とその対策 中性化，コンクリート工学，vol.32， No.2， pp.72-83， 1994.2
- 2-11) 依田彰彦：40年間自然暴露した高炉セメントコンクリートの中性化と仕上材の効果，セメント・コンクリート論文集，No.56， pp.449-454， 2002.12
- 2-12) 土木学会：コンクリート標準示方書，維持管理編， pp.85， 2002
- 2-13) 大久保孝昭ほか6名：長期間屋外暴露された人工軽量骨材コンクリートの諸性状，日本建築学会構造系論文報告集，第561号， pp.23-29， 2002.11
- 2-14) 玉井孝幸ほか5名：25年経過した実大RC壁体における普通および流動化コンクリートの中性化に関する研究，日本建築学会構造系論文報告集，第614号， pp.1-7， 2007.4
- 2-15) 杉山央ほか3名：高強度コンクリートを用いた実大柱部材の材齢15年における強度性状および中性化，日本建築学会構造系論文報告集，第631号， pp.1459-1466， 2008.9
- 2-16) 和泉意登志ほか1名：経年建築物におけるコンクリートの中性化と鉄筋の腐食，日本建築学会構造系論文報告集，第406号， pp.1-12， 1989.12

- 2-17) 川西泰一郎ほか 2 名：実建物調査に基づくコンクリートの中性化進行に関する分析，日本建築学会構造系論文集，第 608 号，pp.9-14，2006.10
- 2-18) 玉井孝幸ほか 4 名：1953 年から 1985 に建設された建物の構造体コンクリートの中性化の実態，日本建築学会技術報告集，vol.13，No.25，pp.1-6，2007.6
- 2-19) 春畑仁一ほか 2 名：既存鉄筋コンクリート造建築物のコンクリート材料調査における圧縮強度と中性化深さの統計，その 1，その 2，日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1，pp.549-552，2011.8
- 2-20) 向井毅：仕上げによるコンクリート構造物の耐久性ならびに美観の向上，コンクリート工学，vol.27，No.2，pp.20-29，1989.2
- 2-21) 馬場明生ほか 1 名：各種の表層面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，Vol.9，No.1，pp.333-338，1987
- 2-22) 福島敏夫ほか 1 名：高分子仕上塗材がコンクリートの中性化進行に及ぼす影響の定量的評価，日本建築学会構造系論文報告集，第 434 号，pp.1-12，1992.4
- 2-23) 兼松学ほか 1 名：建築用仕上材料によるコンクリートの中性化抑制モデルに関する研究，コンクリート工学年次論文集，vol.27，No.1，pp.637-642，2005
- 2-24) 李榮蘭ほか 1 名：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報告集，第 649 号，pp.499-504，2010.3
- 2-25) 本橋健司ほか 1 名：コンクリート仕上げ材料の中性化抑制性能評価における熱重量分析の応用，日本建築学会構造系論文報告集，第 579 号，pp.15-21，2004.5
- 2-26) 河野政典ほか 3 名：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報告集，第 584 号，pp.15-21，2004.10
- 2-27) 長谷川拓哉ほか 3 名：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報告集，第 609 号，pp.23-30，2006.11
- 2-28) 榊田佳寛ほか：仕上材によるコンクリートの中性化抑制効果に関する基礎的研究，その 1～3，日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1，pp.541-546，2011.8
- 2-29) 親本俊憲ほか：仕上材によるコンクリートの中性化抑制効果に関する基礎的研究，その 4～6，日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1，pp.465-470，2012.9
- 2-30) 渡邊悟士ほか：仕上材によるコンクリートの中性化抑制効果に関する基礎的研究，その 7～8，日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1，pp.397-400，2013.8

- 2-31) 梶田佳寛ほか：仕上材を施したコンクリートの中性化抑制に関する検討，その1～4，日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1，pp.495-502，2016.8
- 2-32) 長谷川拓哉ほか3名：モデル建物の11年屋外暴露試験結果に基づく表面仕上材の中性化に対する保護効果，日本建築学会構造系論文報告集，第555号，pp.37-43，2002.5
- 2-33) 唐沢智之ほか2名：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報告集，第669号，pp.1885-1890，2011.11
- 2-34) 斉藤辰弥ほか3名：長期間暴露したコンクリートの性質に関する実験，その1，日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1，pp.433-434，2014.9
- 2-35) 嵩英雄ほか3名：経年 RC 構造物におけるコンクリートの中性化と鉄筋の腐食，コンクリート工学年次論文集，vol.6，pp.181-184，1984
- 2-36) 並木洋ほか2名：RC 造建物のコンクリートの中性化に及ぼす各種要因の影響に関する調査，日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1，pp.1153-1154，2005.9
- 2-37) 片桐由紀子ほか6名：高経年 RC 造建築物の中性化に関する調査研究，日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1，pp.467-468，2001.9
- 2-38) 吉田理紗ほか2名：RC 造建物のコンクリート強度と中性化深さに及ぼす要因及び劣化診断手法の検討，日本建築学会大会東北支部研究報告集，pp.147-150，2011.6
- 2-39) 親本俊憲ほか5名：躯体コンクリートの中性化抑制に寄与する各種仕上げ材の評価，その5，日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1，pp.1131-1132，2007.8
- 2-40) 鄭載東ほか2名：モルタルの中性化速度に及ぼす温度・湿度の影響に関する実験的研究，コンクリート工学論文集，vol.1，No.1，pp.85-94，1990.1
- 2-41) 鶴木圭一ほか1名：局所的な内部温・湿度状態がコンクリート造建築物に及ぼす影響に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，vol.31，No.1，pp.967-972，2009
- 2-42) 木野瀬透ほか6名：築49年を経過した既存鉄筋コンクリート造建築物の材料調査，その3，日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1，pp.1125-1126，2014.9

## 第3章 実建築物の個別詳細調査による中性化と鉄筋腐食の実態把握

### 3.1 はじめに

鉄筋コンクリート造（以下、RC造と略記）建築物の耐用年数は、構造耐力上問題となるまで鉄筋が腐食した時点までとされており、RC造建築物の適切な耐久性評価を行うには実建築物における鉄筋腐食の把握と要因分析が必要である。

しかし、供用中の建築物では、鉄筋腐食の把握のための躯体のはつりや、中性化や含水率などの腐食にかかる要因分析のためのコア採取などの破壊調査の実施やその範囲には制約がある。

そこで、本章では、建替え事業に伴い解体除却される築後53年を経過した現場打ち壁式RC造の集合住宅1棟を利用して、通常では実施が困難な多数量による調査を行うこととし、鉄筋腐食状況の把握ならびに鉄筋腐食が生ずる要因を検討するために中性化深さ、かぶり厚さ、仕上げ材の塗厚およびコンクリートの含水率などの測定を実施し、個別建築物における劣化の実態を詳細に把握することとした。

また、築後48～49年を経過した現場打ち壁式RC造の集合住宅2棟において、建築物の一般的な耐久性調査で実施される調査数量に基づいて、中性化深さの測定などをあわせて実施した。

ここでの上記3棟についての調査結果は、本論文の第4章から第6章における調査研究成果をもとに第7章で提案する劣化評価方法の検証のデータとしても用いるものである。

### 3.2 中性化深さの実態調査

#### 3.2.1 調査概要

##### (1) 調査対象建築物

調査対象建築物の概要を表3.2.1-1に示す。調査対象建築物は、1960年代に建設された現場打ち壁式RC造集合住宅3棟（建築物A、建築物B、建築物C）であり、調査時点では築後48～53年であった。平面形状はほぼ長方形で、余裕のある隣棟間隔を確保して配置された団地内の建築物である。外壁面のコンクリートにはモルタル仕上げの上に、表層仕上げとして色モルタル（着色したモルタルで、仕様書上の塗厚は3mm以上）もしくはリシン吹付が施されている。

これらの建築物において、外部環境に曝される打放し仕上げの部位は限られており、写真3.2.1-1に示すような地盤面+500mm程度の高さがある基礎立上り部の1階床下側の側面が該当する。日射は受けず雨がかりはないが、換気口を介して外気の流入があり、CO<sub>2</sub>濃度は屋外と同等と考え

られる。本章で打放し仕上げの部位とは、この部分のことを指す。一方、基礎立上り部の屋外側の側面は、外壁と連続した立面になっており、モルタル仕上げが施されている（写真 3.2.1-2）。

使用されたコンクリートは、普通ポルトランドセメントによる普通コンクリートで、部位により設計基準強度や仕様に違いはない。



写真 3.2.1-1 基礎立上り部でのコア採取



写真 3.2.1-2 基礎立上り部で採取したコア

表 3.2.1-1 調査対象建築物の概要

項目	建築物 A	建築物 B	建築物 C
所在地	埼玉県草加市	東京都足立区	東京都清瀬市
外 観			
基準階平面図			
構造種別・階数・用途	現場打ち壁式 RC 造・4 階・集合住宅	現場打ち壁式 RC 造・5 階・集合住宅	現場打ち壁式 RC 造・5 階・集合住宅
竣工年	1963 年	1964 年	1967 年
調査年（経過期間 t）	2016 年（53 年）	2013 年（49 年）	2015 年（48 年）
コンクリートの種類	普通コンクリート	普通コンクリート	普通コンクリート
セメントの種類	普通ポルトランドセメント	普通ポルトランドセメント	普通ポルトランドセメント
設計基準強度 $F_c$	$15\text{N/mm}^2$ （建設時： $150\text{kg/cm}^2$ ）	$15\text{N/mm}^2$ （建設時： $150\text{kg/cm}^2$ ）	$16.5\text{N/mm}^2$ （建設時： $165\text{kg/cm}^2$ ）
調合強度 $F$ の定め方 ／適用された工事共通 仕様書 <sup>3-1),3-2)</sup> による	$F=F_c+\sigma$ $\sigma$ ：標準偏差の標準値で $2.0\sim 3.5\text{N/mm}^2$	$F=F_c+\sigma$ $\sigma$ ：標準偏差の標準値で $2.0\sim 3.5\text{N/mm}^2$	$F=F_c+\sigma+t$ $\sigma$ ：標準偏差の標準値で $2.5\sim 4.5\text{N/mm}^2$ $t$ ：温度補正值の標準値で $1.5\sim 4.0\text{N/mm}^2$
RC 壁厚さ	耐力壁：150 mm（最上階），180 mm， 非耐力壁：100～120 mm	耐力壁：150 mm（最上階），180 mm， 非耐力壁：100～120 mm	耐力壁：150 mm（最上階），180 mm 非耐力壁：100～120 mm
外壁仕上げ	モルタル仕上げの上に色モルタル吹付	モルタル仕上げの上にリシン吹付	モルタル仕上げの上にリシン吹付
外壁改修仕上げ（年）	リシン吹付（1983 年）	リシン吹付（1981 年）	リシン吹付（不明）
基礎立上り部厚さ	230 mm	200 mm	200 mm
基礎立上り部仕上げ	モルタル仕上げ（屋外），打放し（床下）	モルタル仕上げ（屋外），打放し（床下）	モルタル仕上げ（屋外），打放し（床下）

## (2) 試験・測定内容

調査対象建築物の外壁および基礎立上り部から、直径 100 mm（一部、75 mm）の貫通コア状の供試体を採取し、コンクリートの圧縮強度試験、中性化深さの測定およびモルタル仕上げの塗厚の測定を行った。圧縮強度試験は、仕上げ部分をカットして行い、JIS A 1107 に準拠した。中性化深さの測定は JIS A 1152 に準拠し、フェノールフタレイン 1% 溶液を割裂面に噴霧して測定した。なお、コア供試体は、1 本で圧縮強度試験と中性化深さの測定を兼用したものと、中性化深さのみを測定したものがある。圧縮強度試験と中性化深さの測定を兼用したコアについては、圧縮強度試験後にコアを割裂させて、中性化深さを測定した。色モルタルを含めたモルタル仕上げの塗厚は、最大と最小と思われる 2 点の厚さをノギスで測定し、その平均値を測定結果とした。なお、本章におけるコンクリートの中性化深さの数値には、モルタル仕上げおよび色モルタルの厚さは含まれていない。

試験・測定項目とその実施数量を表 3.2.1-2 に、コア採取位置の例を図 3.2.1-1～3.2.1-3 に示す。コア採取高さは外壁で各階の床レベル+1,000 mm 程度、基礎立上り部で地盤面+300～500 mm の位置である。中性化深さに関して、外壁については、屋外側のデータのみを、基礎立上り部については、屋外側と床下側の両データを検討対象とする。なお、一部コアは貫通ができずに途中で折取ったため、屋外側に比べて床下側のデータが少ない場合がある。また、建築物 A では、温度・相対湿度を測定しており、後述の表 4.2.4-1 で示した建築物に該当する。

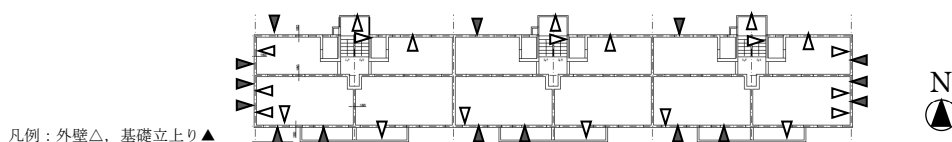


図 3.2.1-1 建築物 A のコア採取位置（1 階と基礎立上り部の例）

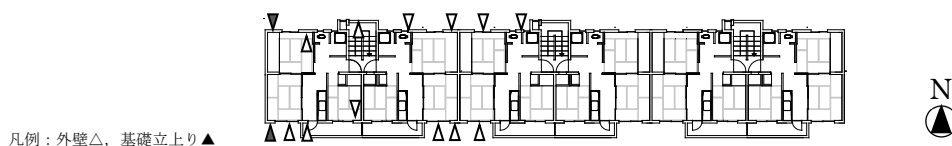


図 3.2.1-2 建築物 B のコア採取位置（1 階と基礎立上り部の例）



図 3.2.1-3 建築物 C のコア採取位置（3 階と基礎立上り部の例）



表 3.2.1-2 調査対象建築物における測定・試験項目と方位別の実施数量

部 位	建築物・方位 測定・試験項目		建築物 A					建築物 B			建築物 C			備考
			南	北	東	西	計	南	北	計	南	北	計	
外 壁	採取コア	5階						1	1	2	—	—	—	<ul style="list-style-type: none"> <li>・建築物 A の西側 4 階はコンクリート全断面が中性化していたため、検討対象外とした</li> <li>・建築物 B は中性化の測定のみ実施したコアが一部ある</li> <li>・建築物 C は 3 階および基礎立上りからのみコア採取した</li> </ul>
		4階	4	6	2	—	12	1	1	2	—	—	—	
		3階	4	9	3	3	19	1	2	3	4	4	8	
		2階	5	9	3	2	19	1	1	2	—	—	—	
		1階	6	9	3	3	21	6	6	12	—	—	—	
		計	19	33	11	8	71	10	11	21	4	4	8	
		圧縮強度試験	19	33	11	8	71	5	7	12	4	4	8	
		中性化深さ（屋外側）	19	33	11	8	71	10	11	21	4	4	8	
		モルタルの塗厚（屋外側）	19	33	11	8	71	10	11	21	4	4	8	
	基 礎 立 上 り	採取コア	6	3	3	3	15	1	1	2	2	1	3	
圧縮強度試験		6	3	3	3	15	1	1	2	2	1	3		
中性化深さ（屋外側）		6	3	3	3	15	1	1	2	2	1	3		
中性化深さ（床下側）		5	3	2	3	13	1	1	2	2	1	3		
モルタルの塗厚（屋外側）		6	3	3	3	15	1	1	2	2	1	3		

### 3.2.2 調査結果

#### (1) 測定結果の概要

各建築物の圧縮強度試験結果，中性化深さおよびモルタル仕上げの塗厚の測定結果について，階数・方位別に整理したものを図 3.2.2-1～3.2.2-9 に，全体の平均値・標準偏差・変動係数を表 3.2.2-1 に示す。なお，各建築物で階数別に分類したデータ数が 5 以上ある場合は，その平均値・標準偏差を図 3.2.2-1～3.2.2-9 の図中に示した。

表 3.2.2-1 試験・測定結果の平均値・標準偏差・変動係数

試験・測定項目		建築物 A	建築物 B	建築物 C
圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	データ数	n=86	n=14	n=11
	平均値	22.1	24.0	36.8
	標準偏差	7.6	5.6	6.5
	変動係数	34.3%	23.3%	17.7%
中性化深さ (mm)	データ数	n=99	n=25	n=14
	平均値	45.6	24.6	8.6
	標準偏差	25.9	15.8	6.2
	変動係数	56.8%	64.2%	72.0%
モルタル仕上げの塗厚 (mm)	データ数	n=86	n=23	n=11
	平均値	17.4	19.0	23.2
	標準偏差	8.7	8.9	11.0
	変動係数	50.0%	46.8%	47.4%

#### (a) 圧縮強度

建築物 A および B の圧縮強度の全体平均値は，設計基準強度の 1.5 倍程度あるが，変動係数が大きい。特に建築物 A では変動係数が 34.3% で，全 86 データ中の 10 データが設計基準強度を下回っていた。建築物 A の建設年では，コンクリートは現場練りで製造されていた可能性が高い。一方，建築物 C の圧縮強度の全体平均値は 36.8N/mm<sup>2</sup> で，建築物 A および B との設計基準強度の差以上に圧縮強度が高く出ており，ばらつきも少ない。この違いは，表 3.2.1-1 に示すように調合強度の定め方による違いや生コンによるポンプ工法の導入によって打設されていたことによる影響が大きいと考えられる。なお，方位による圧縮強度の違いは明瞭には表れなかった。

※下図の各棒グラフにおける、採取コアの各方位における並び順は、右図の矢印に示すような建築物平面における採取位置の並び順による。

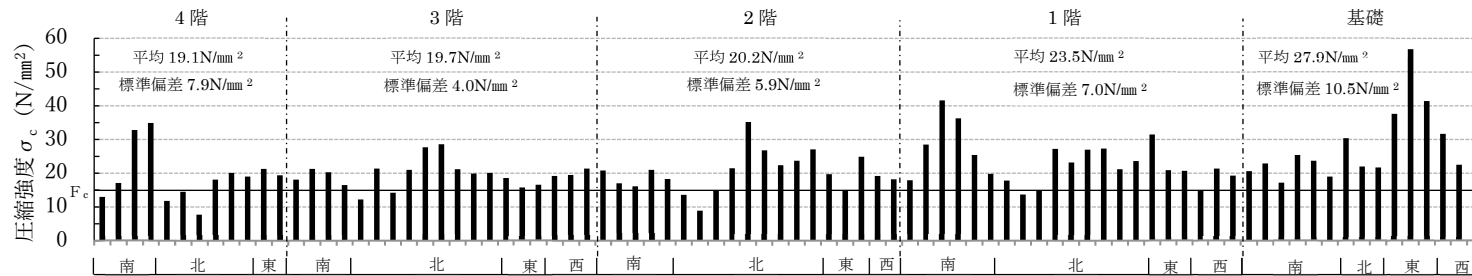
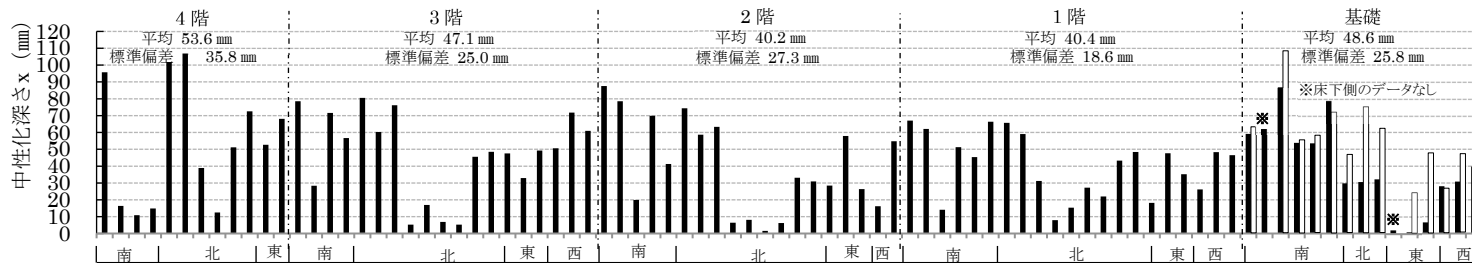


図 3. 2. 2-1 建築物 A の採取コアの圧縮強度



\*1...図中の「基礎」における白抜きの棒グラフは、その左隣の黒棒グラフのコアにおける床下側(打放し仕上げ)のデータを示す。

図 3. 2. 2-2 建築物 A の採取コアの中性化深さ\*1

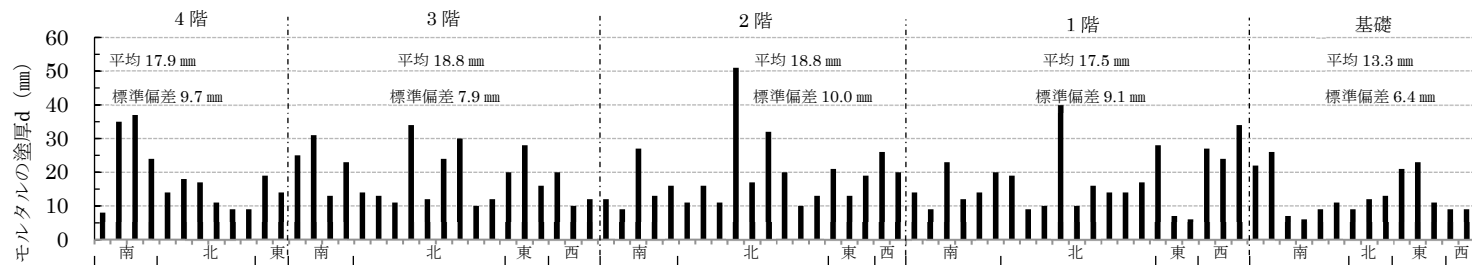


図 3. 2. 2-3 建築物 A の採取コアのモルタルの塗厚

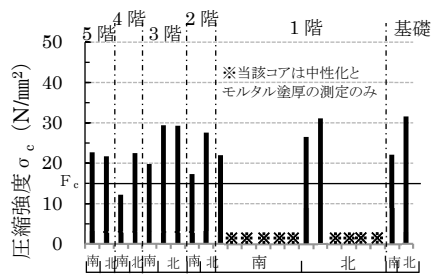
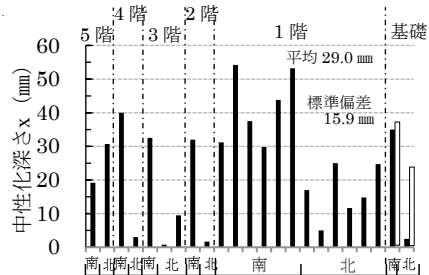


図 3.2.2-4

建築物 B の採取コアの圧縮強度



\*1...図中の「基礎」における白抜き棒グラフは、その左隣の黒棒グラフのコアにおける床下側(打放し仕上げ)のデータを示す。

図 3.2.2-5 建築物 B の採取コアの中性化深さ\*1

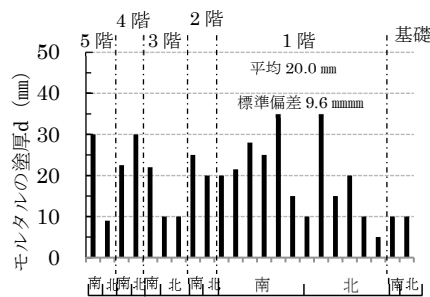


図 3.2.2-6 建築物 B の採取コアのモルタルの塗厚

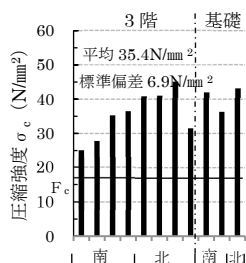
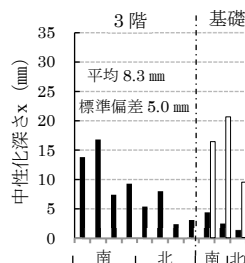


図 3.2.2-7

建築物 C の採取コアの  
圧縮強度



\*1...図中の「基礎」における白抜き棒グラフは、その左隣の黒棒グラフのコアにおける床下側(打放し仕上げ)のデータを示す。

図 3.2.2-8  
建築物 C の採取コアの  
中性化深さ\*1

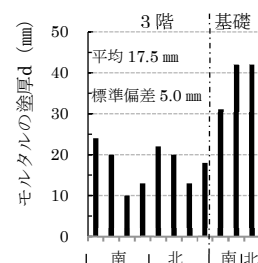


図 3.2.2-9

建築物 C の採取コアの  
モルタルの塗厚

(b) 中性化深さ

各建築物の全コアでコンクリート部分が中性化していたが、中性化深さは建築物ごとおよびコアごとにばらつきが大きい。全体の平均値は、建築物 A が 45.6 mm、建築物 B が 24.6 mm、建築物 C が 8.6 mm で、建築物 A の進行が特に著しいが、変動係数はいずれの建築物においても 50% を超えている。

本測定結果について、中性化深さが経過期間の平方根に比例するいわゆる $\sqrt{t}$  則に従った式(3.2.2-1)により求めた中性化速度係数とその中性化深さを測定したコア供試体の圧縮強度との関係について、全データを図 3.2.2-10 に、基礎立上り部床下側の打放し仕上げのみ抽出したデータを図 3.2.2-11 に示す。また、図 3.2.2-11 には、参考として、式(3.2.2-2)に示す長谷川らの式<sup>3-3)</sup>を併せて示す。なお、式(3.2.2-2)は、仕上げ材が施されていないコンクリート供試体による屋外暴露試験のデータに基づいている

$$d_c = A\sqrt{t} \quad (3.2.2-1)$$

ここで、 $d_c$ : 中性化深さ (mm)

$A$ : 中性化速度係数 (mm/ $\sqrt{\text{年}}$ ),

$t$ : 経過期間 (年), とする。

$$A = 23.8(1/\sqrt{\sigma_c} - 0.13) \quad (3.2.2-2)$$

ここで、 $\sigma_c$ : コンクリートの圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)

図 3.2.2-10 では、同一圧縮強度付近における中性化速度係数の範囲の幅が非常に大きい。これはモルタル仕上げの塗厚の差異に起因しており、塗厚の違いによってモルタル仕上げの中性化抑制効果が異なることが影響していると考えられる。一方、図 3.2.2-11 は、図 3.2.2-10 からモルタル仕上げのデータを除外した打放し仕上げのデータのみを示したものであるため、同一圧縮強度における中性化速度係数の範囲の幅が図 3.2.2-10 に比べて小さい。図 3.2.2-11 では、実建築物の中性化速度係数の方が、式(3.2.2-2)よりも大きくなった。これは、他の調査結果<sup>3-4)</sup>と同様である。

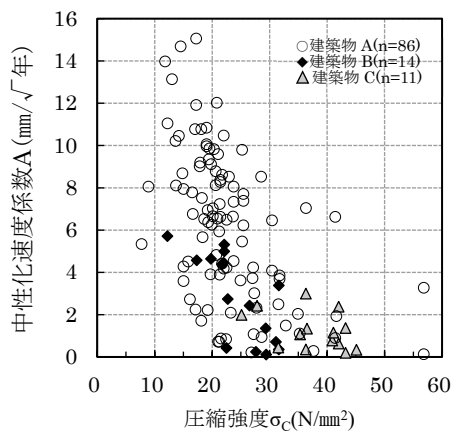


図 3.2.2-10 圧縮強度と中性化速度係数の関係 (全データ)

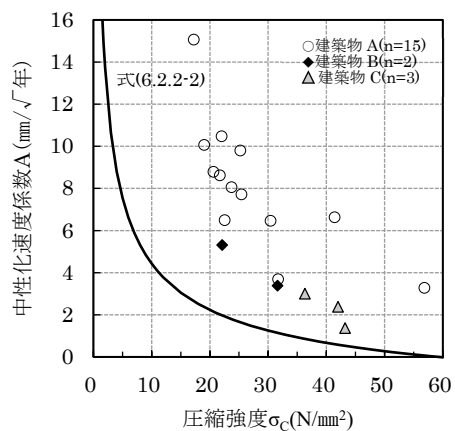
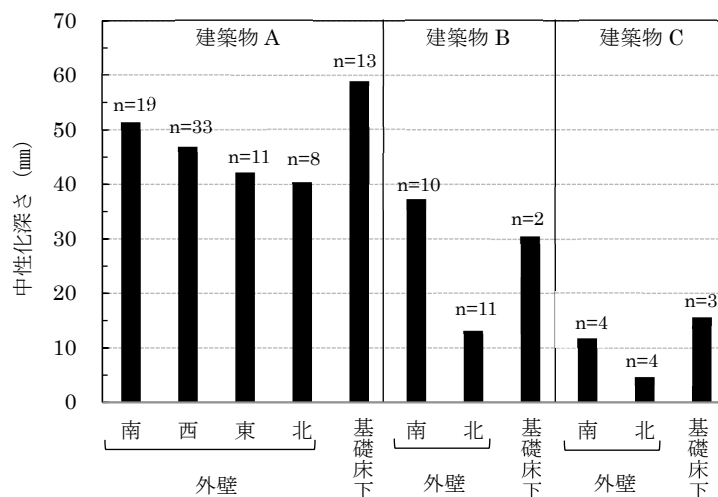


図 3.2.2-11 圧縮強度と中性化速度係数の関係 (基礎床下の打放し仕上げのみ)

外壁における方位別および基礎床下の中性化深さの平均値・標準偏差・変動係数を表 3.2.2-2 に、平均値を棒グラフで比較したものを図 3.2.2-12 に示す。ここで、床下については、日射の影響は関係しないため、採取方位ごとに区分しないでひとまとめにした。外壁における方位別の中性化深さについては、3棟とも調査数量に関わらず全体的な傾向として北面より南面が進行している。特に建築物 B ではその違いが顕著である。基礎床下（図 3.2.2-2，図 3.2.2-5，図 3.2.2-7 で白抜き棒グラフ）は、打放し仕上げであるため、モルタル仕上げの外壁に比べて、全体的に中性化が進行している。変動係数は、外壁に比べて基礎床下が比較的小さい傾向にある。

表 3.2.2-2 部位別・方位別の中性化深さの平均値・標準偏差・変動係数

建築物	建築物 A					建築物 B			建築物 C		
	外壁 南面	外壁 北面	外壁 東面	外壁 西面	基礎 床下	外壁 南面	外壁 北面	基礎 床下	外壁 南面	外壁 北面	基礎 床下
データ数	n=19	n=33	n=11	n=8	n=13	n=10	n=11	n=2	n=4	n=4	n=3
平均値	51.4	40.4	42.2	46.9	58.9	37.3	13.1	30.5	11.8	4.7	15.6
標準偏差	27.2	29.6	15.1	18.0	22.2	10.9	10.3	9.5	4.3	2.5	5.7
変動係数	53.0%	73.3%	35.8%	38.4%	37.7%	29.1%	79.0%	31.3%	36.0%	53.6%	36.6%



※仕上げ材の種類：「外壁」はモルタル仕上げのうえりシン吹付，「基礎床下」は打放し

図 3.2.2-12 部位別の中性化深さの平均値の比較

### (c) モルタル仕上げの塗厚

外壁におけるモルタル仕上げの塗厚の平均値はいずれの建築物も 18 mm 前後であるが、標準偏差が 9 mm 程度あり、変動係数は大きい。基礎立上り部の屋外側のモルタル仕上げの塗厚は、建築物 A および B では外壁に比べて薄い、建築物 C では大幅に厚いなど、建築物ごとに違いが見られた。データ数が多い建築物 A について、外壁のモルタル仕上げの塗厚の度数分布を図 3.2.2-13 に示す。調査対象建築物の建設年代では、現場打ちコンクリートの外壁にモルタル仕上げを施す場合には、型枠の施工精度などに起因する躯体表面の不陸調整も兼ねられていたため、塗厚が厚くなる方向側に幅広く分布している。

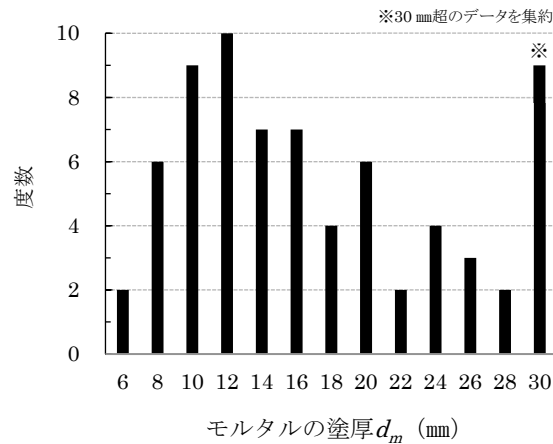


図 3.2.2-13 建築物 A の外壁におけるモルタルの塗厚の度数分布

### (2) モルタル仕上げが施されたコンクリートの中酸化進行の解析

モルタル仕上げが施されたコンクリートの中酸化進行は、モルタル仕上げおよびコンクリートの中を  $\text{CO}_2$  が近似的に Fick の第一法則に従って定常拡散し、モルタル仕上げもしくはコンクリートの中酸化領域と未中酸化領域との境界で  $\text{CO}_2$  がそこに存在する  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  と瞬時に反応して、境界が順次移動するという現象を表す方程式による解によって理論的に説明され、図 3.2.2-14 のようにモルタル仕上げが全て中酸化しコンクリートが中酸化進行しているときは式(3.2.2-3)によって表されるモデルが李・梶田によって提案されている<sup>3-5)</sup>。

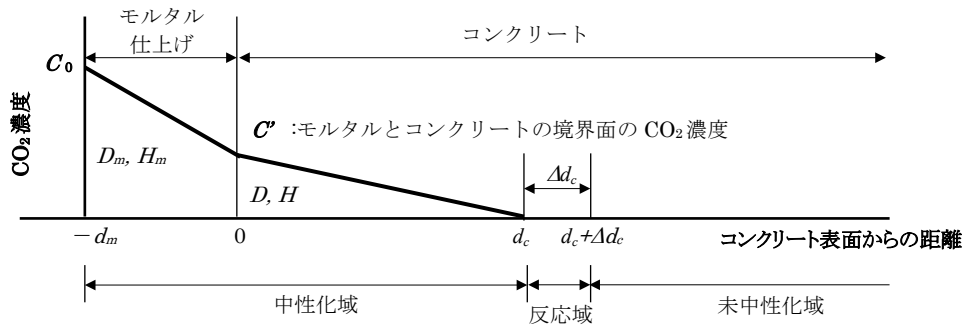


図 3.2.2-14 CO<sub>2</sub>の拡散の模式図

$$d_c = A_c \left\{ \sqrt{(t - T) + R^2} - R \right\} \quad (3.2.2-3)$$

ここで、 $d_c$  : コンクリートの中性化深さ (mm)

$A_c$  : コンクリートの中性化速度係数 (mm/√年)

$R$  : モルタル仕上げの中性化抵抗 (√年)

$t$  : 経過期間 (年)

$T$  : モルタル仕上げ全断面の中性化期間 (年)

で、 $A_c$ ,  $R$ ,  $T$ は次のように表される。

$$A_c = \sqrt{\frac{2D \cdot C_0}{H}}, \quad R = \sqrt{\frac{H \cdot D \cdot d_m^2}{2D_m^2 \cdot C_0}}, \quad T = \frac{H_m \cdot d_m^2}{2D_m \cdot C_0}$$

ここで、 $D$  : コンクリートの拡散係数 (mm<sup>2</sup>/年)

$H$  : コンクリートの単位体積あたりの Ca(OH)<sub>2</sub> 濃度 (mol/mm<sup>3</sup>)

$C_0$  : モルタル仕上げ表面の CO<sub>2</sub> 濃度 (mol/mm<sup>3</sup>)

$D_m$  : モルタル仕上げの拡散係数 (mm<sup>2</sup>/年)

$d_m$  : モルタル仕上げの塗厚 (mm)

$H_m$  : モルタル仕上げの単位体積あたりの Ca(OH)<sub>2</sub> 濃度 (mol/mm<sup>3</sup>)、とする。

また、 $A_c$ と  $R$ の間には次の式が成立する。

$$A_c \cdot R = \frac{D \cdot d_m}{D_m} \quad (3.2.2-4)$$



本モデルを実建築物の調査結果に適用し、評価を行った。なお、前述したように本調査におけるコンクリートは全データ、中性化の進行が認められている。

具体の解析手順は以下のとおりである。

調査により既知である  $t$ ,  $d_m$ ,  $x$  を用いて、 $A_c$  およびモルタル仕上げの中性化速度係数  $A_m$  (mm/√年) を求めるために式(3.2.2-3)を以下のように整理する。

$$B = \frac{H}{2D_m \cdot C_0} \left( \frac{D}{D_m} - \frac{H_m}{H} \right), \quad E = \frac{D}{D_m}$$

とおくと、式(3.2.2-3)は次のようにまとめられる。

$$d_c = A_c \sqrt{t + B \cdot d_m^2} - E \cdot d_m \quad (3.2.2-5)$$

式(3.2.2-3)において、モルタル仕上げが全て中性化し、コンクリートの中性化が進行しているデータについて、モルタル仕上げの塗厚を  $d_{mi}$  ( $i=1,2,3,\dots$ ) とし、その時のコンクリートの中性化深さを  $d_{ci}$  ( $i=1,2,3,\dots$ ) とすると、 $A_c$ ,  $B$ ,  $E$  は最小二乗法を用いて求まる。

また、

$$A_m = \sqrt{\frac{2D_m \cdot C_0}{H_m}} \quad (3.2.2-6)$$

であるから、 $B$  を次式のように置換えて、 $A_m$  が求められる。

$$\frac{H}{2D_m \cdot C_0} = \frac{H_m}{2D_m \cdot C_0} \cdot \frac{H}{H_m} = \left( \frac{1}{A_m} \right)^2 \cdot E \cdot \left( \frac{A_m}{A_c} \right)^2 = \left( \frac{1}{A_c} \right)^2 \cdot E$$

$$B = \frac{H}{2D_m \cdot C_0} \left( \frac{D}{D_m} - \frac{H_m}{H} \right) = \left( \frac{1}{A_c} \right)^2 \cdot E \cdot \left\{ E - \frac{1}{E} \left( \frac{A_c}{A_m} \right)^2 \right\} = \left( \frac{E}{A_c} \right)^2 - \left( \frac{1}{A_m} \right)^2$$

$$A_m = \frac{A_c}{\sqrt{E^2 - BA_c^2}} \quad (3.2.2-7)$$

式(3.2.2-3)の解として求めたコンクリートの中性化速度係数  $A_c$  およびモルタルの中性化速度係数  $A_m$  ならびに基礎立上り部床下側で測定した中性化深さ  $d_c$  から式(3.2.2-1)で求めた打放し仕上げのコンクリートの中性化速度係数  $A_f$  を表 3.2.2-3 に、モルタル仕上げの塗厚  $d_m$  および中性化深さ  $d_c$  の各測定結果ならびに式(3.2.2-5)の回帰式を図 3.2.2-15(a)～図 3.2.2-15(h)に、各建築物の方位別にそれぞれ示す。また、各中性化速度係数における南面／北面の中性化比率を表 3.2.2-4 に示す。

なお、コンクリートの中性化速度係数  $A_c$  の算出において、基礎立上り部床下側のデータは含まれていない。また、打放し仕上げのコンクリートの中性化速度係数  $A_f$  は、各コア算定値の平均とした。

表 3.2.2-3 中性化速度係数 (mm/√年) の比較

	建築物 A				建築物 B		建築物 C	
	南面	北面	東面	西面	南面	北面	南面	北面
$A_m^{*1}$	6.3	6.2	6.6	16.5	17.7	5.5	9.1	10.2
$A_c^{*2}$	12.4	8.6	7.3	7.0	6.5	2.9	2.1	0.9
$A_f^{*3}$	8.1				4.4		2.3	

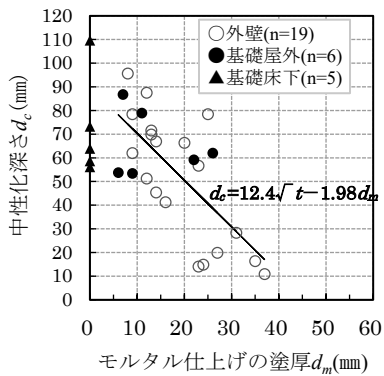
\*1  $A_m$  : 式(3.2.2-7)から求めたモルタル仕上げの中性化速度係数

\*2  $A_c$  : 式(3.2.2-3)から求めたモルタル仕上げが施されたコンクリートの中性化速度係数

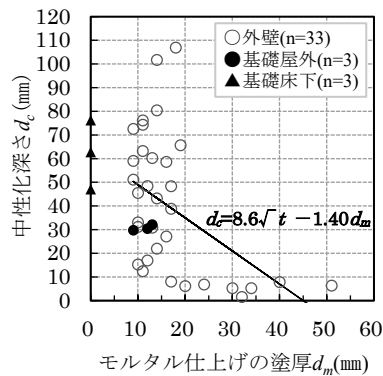
\*3  $A_f$  : 式(3.2.2-1)から求めた打放し仕上げのコンクリートの中性化速度係数

表 3.2.2-4 各中性化速度係数における方位別の中性化比率の比較

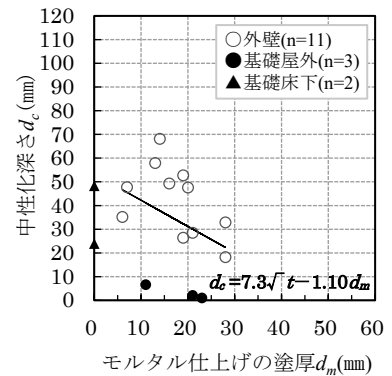
	建築物 A	建築物 B	建築物 C
$A_m$ の南面／北面の比率	1.02	3.22	0.89
$A_c$ の南面／北面の比率	1.44	2.24	2.33
$A_f$ の南面／北面の比率	1.16	1.56	1.93



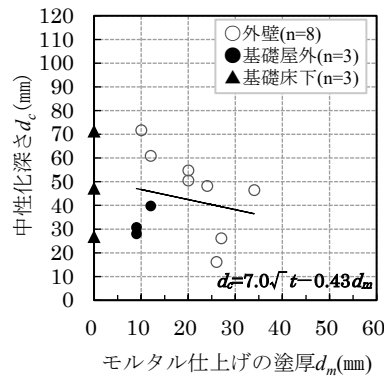
(a) 建築物 A (t=53 年) ・南面



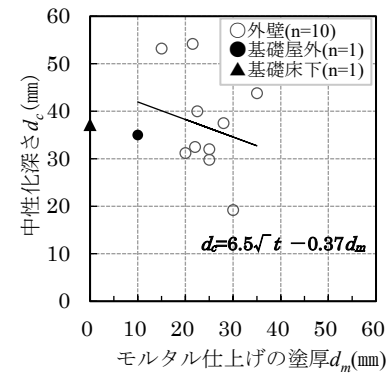
(b) 建築物 A (t=53 年) ・北面



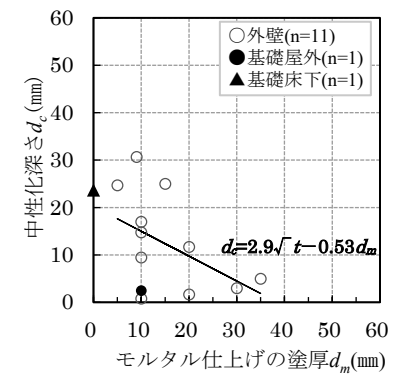
(c) 建築物 A (t=53 年) ・東面



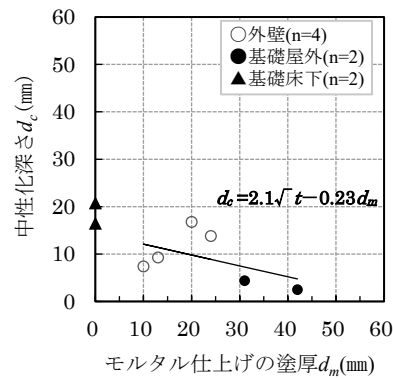
(d) 建築物 A (t=53 年) ・西面



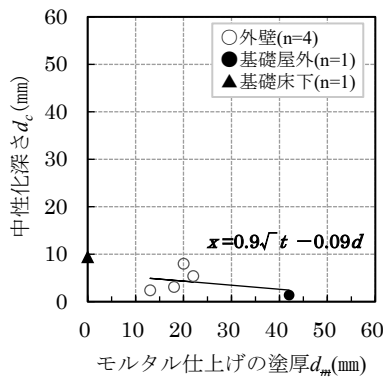
(e) 建築物 B (t=49 年) ・南面



(f) 建築物 B (t=49 年) ・北面



(g) 建築物 C (t=48 年) ・南面



(h) 建築物 C (t=48 年) ・北面

図 3.2.2-15 各建築物・各方位におけるモルタル仕上げの塗厚と中性化深さの関係および式(3.2.2-5)の回帰式

解析結果を以下にまとめる。

- 1) 建築物の方位が中性化進行に与える影響として、南北による差異を比較的明瞭に評価することができた。南面の方が中性化進行が早い。
- 2) 最小二乗法で求めた式(3.2.2-5)の回帰式の各係数のうち、全ての建築物・方位で  $B \doteq 0$  となった。これは、式(3.2.2-3)において  $T=R^2$ 、すなわち  $H_m \cdot D_m = H \cdot D$  であり、このときには、セメント系の仕上げ材が施されたコンクリートの中性化進行として馬場らが提案した式(3.2.2-8)<sup>3-6)</sup>と結果として同じになる。また、式(3.2.2-7)は  $A_m \doteq A_c/E$  になる。

$$d_c = A_c(\sqrt{t} - R) \quad (3.2.2-8)$$

- 3) 図 3.2.2-15(a)～図 3.2.2-15(h)に示すように、本調査におけるモルタル仕上げの中性化抑制効果は、コンクリートとモルタルの拡散係数の比  $E$  として表され、塗厚の増加幅に対するコンクリートの中性化深さの減少幅の比としてほぼ直線的に評価された。モルタル仕上げの塗厚に応じた効果を  $E \cdot d_m$ 、すなわちコンクリートに対する等価かぶり厚さとみなして、コンクリートの中性化深さ  $d_c$  に加算すると、コンクリートの中性化速度係数  $A_c$  が簡易的に算出可能である。
- 4)  $E$  は 0.09～1.98、モルタル仕上げの中性化速度係数  $A_m$  は 5.5～17.7 (mm/ $\sqrt{\text{年}}$ ) と非常に幅がある結果になった。コンクリートに施されるモルタル仕上げは、仕様や調合に特に定めがなく、重ね塗りされたモルタルの層ごとの品質に違いがある可能性や、またひび割れ、コンクリートとのはく離などの劣化の影響があることがその要因と考えられる。図 3.2.2-15(d), (e)のようにモルタル仕上げの塗厚  $d_m$  が厚いが、そのときのコンクリートの中性化深さ  $d_c$  が大きいデータがある場合にモルタル仕上げの中性化速度係数  $A_m$  は特に大きな値として評価される。
- 5) 本解析方法で求めた各建築物のモルタル仕上げが施されたコンクリートにおけるコンクリート部分の中性化速度係数  $A_c$  はばらつきがある中での平均的な数値であるが、検証目的で採取した打放しコンクリート部分の中性化速度係数  $A_c$  と傾向は概ね一致しており、モルタル仕上げによる中性化抑制効果とコンクリートの中性化進行をある程度適切に評価できたと考えられる。

### (3) 考察

以上のように、建築物の劣化調査において中性化傾向を把握するには、調査結果を部位別・方位別に分類して中性化深さを分析する方法が簡便である。しかし、これらの分類は物理量による指標に基づいていないため、ある部位と部位、ある方位と方位に中性化進行の差異があるような事象について、物理的要因に裏付けられて分析されたものではない。また、コアごとにモルタル仕上げの塗厚にばらつきがあり、仕上げによる中性化抑制効果が異なっているため、コンクリートの中性化進行をコンクリートの中性化深さおよび $\sqrt{t}$  則から単純に求めた中性化速度係数にもとづいた結果で比較してしまうと、建築物の中性化傾向の差異を正しく評価したことにはならない。(2)で示したように、解析によってモルタル仕上げの中性化速度係数を建築物個別に算出してもばらつきが大きいので、あらかじめ標準的な数値を把握しておき、それと照らし合わせないと解析結果を相対的に位置付けて評価することができない。

よって、建築物全体において中性化傾向の差異がある中で、建築物のある特定の位置で測定されたコンクリートの中性化深さの結果を建築物の代表値とみなすには、その位置における中性化に影響を及ぼす環境条件と仕上げ材による中性化抑制効果を定量的に明らかにしたうえで、中性化進行を評価する必要がある。例えば、部位別ならびに方位別に差異が生ずる環境条件の因子を温度・湿度などの物理量となる指標によって関係づけること、モルタル仕上げにおいては仕上げ部分の中性化抑制効果を中性化抵抗値 ( $\sqrt{\text{年}}$ ) として考慮し中性化速度係数 ( $\text{mm}/\sqrt{\text{年}}$ ) の標準値を塗厚 (mm) の違いに応じた求めることで、部位別ならびに方位別の中性化傾向の差異を定量的に関係づけられ、ある測定位置における中性化深さの結果から他の位置の中性化深さの予測も可能になると考える。

### 3.3 鉄筋腐食状況の実態調査とその要因分析

#### 3.3.1 調査概要

##### (1) 調査対象建築物

調査対象建築物は、表 3.2.1-1 に示す建築物 A である。

##### (2) 試験・測定内容

試験・測定内容を表 3.3.1-1 に示す。第 3 章 2 節 1 項の内容に加えて、仕上げ面の劣化状況、鉄筋の腐食状況、はつり調査による中性化深さ、かぶり厚さ、コンクリートの質量含水率の調査を行った。試験・測定方法は以下である。

仕上げ面の劣化状況は、はつりの前に外観目視によるひび割れの有無の確認、クラックスケールによるひび割れ幅の計測を行った。

表 3.3.1-1 試験・測定内容

項目	方法
仕上げ面の劣化状況	ひび割れの有無などを外観目視により確認
鉄筋の腐食状況	はつり箇所で見視
コンクリート中性化	はつり箇所にフェノールフタレイン溶液を噴射
かぶり厚さ	はつり箇所で見製巻尺による測定
コンクリート圧縮強度	湿式コア採取による圧縮強度試験
コンクリート含水率	乾式コアを採取し、乾燥後前後の質量を計量

鉄筋の腐食状況の調査、中性化深さおよびかぶり厚さの測定は、電動のコンクリート用はつりノミで仕上げ材およびコンクリートをはつりとり、鉄筋を露出させて行った。鉄筋の腐食状況は、表 3.3.1-2 示す「鉄筋コンクリート造建築物の耐久性調査・診断および補修指針（案）・同解説」<sup>3-7)</sup>の鉄筋腐食度評価基準に基づき、目視で腐食グレードを判定した。中性化深さの測定は、フェノールフタレイン 1%溶液をはつり面に噴霧し、鋼製巻尺で測定した。かぶり厚さは、鉄筋の最外部から、コンクリートとモルタル仕上げの境界までの最短距離とし、鋼製巻尺で測定した。併せて、モルタル仕上げの厚さも測定した。

コンクリートの質量含水率は、乾式コアドリルにより直径 75 mmのコアを採取して仕上げ部分をカットし、図 3.3.1-1 および写真 3.3.1-1 に示すようにコア両端部から各々約 40 mmの位置でドライカッターを用いてコアを 3 分割して得た各試料を、JIS A 1476 に準拠した方法により乾燥前後の試料の質量を計量して算出した。乾燥温度は 105℃とした。

表 3.3.1-2 鉄筋腐食度評価基準<sup>3-7)</sup>

腐食グレードと評価基準	
I	腐食がない状態，または表面にわずかな点さびが生じている状態。
II	表面に点さびが広がって生じている状態。
III	点さびがつながって面さびとなり，部分的に浮きさびが生じている状態。
IV	浮きさびが広がって生じ，コンクリートにさびが付着し，断面積で 20%以下の欠損を生じている箇所がある状態。
V	厚い層状のさびが広がって生じ，断面積で 20%を超える著しい欠損を生じている箇所がある状態。

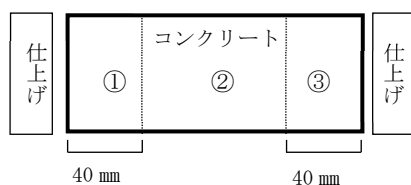


図 3.3.1-1 含水率測定用試料



写真 3.3.1-1 含水率測定用試料

### (3) 調査位置

はつり調査位置を図 3.3.1-2～3.3.1-6 に示す。図中の数字は、調査位置の通し番号である（以下、調査位置 No.と略記。）。

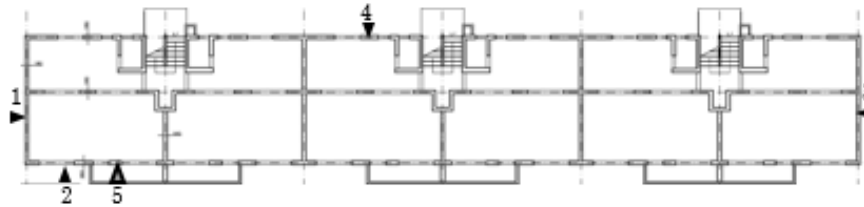


図 3.3.1-2 基礎立上りのはつり調査位置

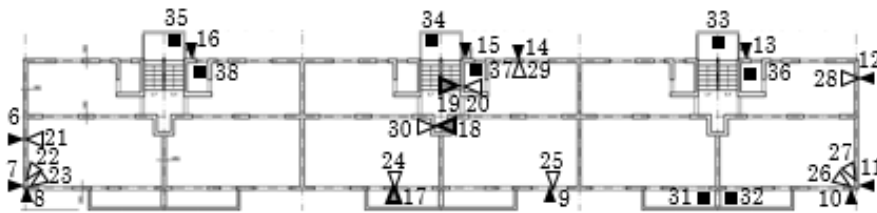


図 3.3.1-3 1階のはつり調査位置

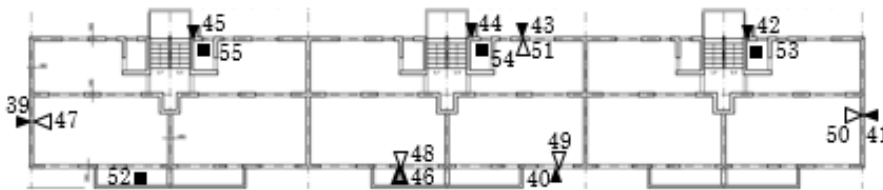


図 3.3.1-4 2階のはつり調査位置

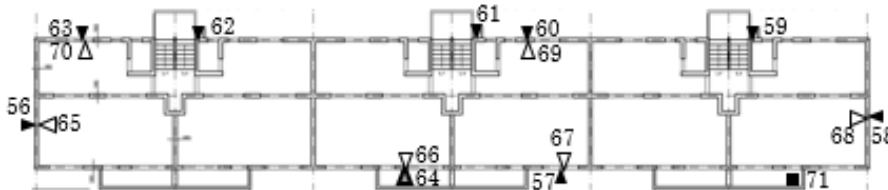


図 3.3.1-5 3階のはつり調査位置

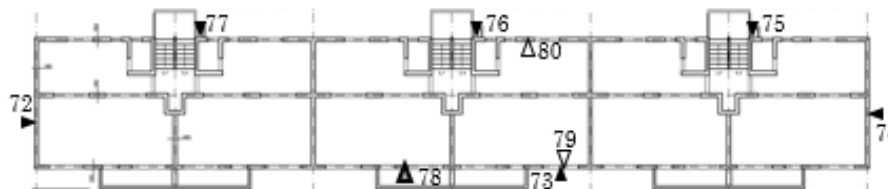


図 3.3.1-6 4階のはつり調査位置



凡例(共通)：屋外雨がかり有りの壁・基礎▲，屋外雨がかり無しの壁・基礎△，屋内壁△  
スラブ■（ただし、31～38、52、64、71は天井、53～55は床）



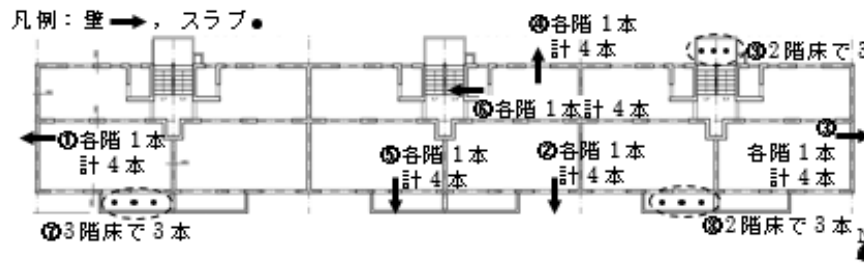


図 3.3.1-7 含水率測定用のはつり調査位置

調査位置の部材別（耐力壁，スラブおよび基礎立上り），環境条件別（屋外および屋内における雨・水がかりの有無）の分類，調査部位，調査位置 No.，および実施した調査数量を表 3.3.1-3 に，仕上げ材の種類を表 3.3.1-4 に示す。

はつり調査位置は全 80 カ所で鉄筋本数は 216 本である。はつり調査位置が同一断面で貫通している場合でも屋外側（天井側）と屋内側（床側）で調査位置 No.は区別している。はつりの平面範囲は原則 200×200 mm程度であるが，一部スラブでは，一辺の辺長が 600 mm，幅が 200 mm程度の L字型などの不整形にはつっている。

含水率測定用のコア供試体の採取位置を図 3.3.1-7 に示す。数量は，耐力壁については 1～4 階のほぼ同一平面位置における採取位置①～⑥からそれぞれ各階 1 本計 4 本ずつの 24 本，スラブは 9 本で，合計 33 本である。供試体は貫通コア状で採取し，その両端面における環境条件と図 3.3.1-7 に示す採取位置①～⑨の関係を表 3.3.1-6 に示す。

表 3.3.1-3 部材別および環境条件別のはつり調査位置と調査数量

	屋 外		屋 内	
	雨がかり有	雨がかり無	水がかり有	水がかり無
耐力壁	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">外壁</div> No.6～16,39～45, 56～63,72～77 (32 カ所 85 本)	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">バルコニー下と階段室の壁</div> No.17～19,46,64,78 (6 カ所 11 本)	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">浴室</div> No.20 (1 カ所 2 本)	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">居室</div> No.21～30,47～51, 65～70,79～80 (23 カ所 46 本)
スラブ	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">バルコニーと階段室の天井</div> No.31～35,52,71 (7 カ所 50 本)	—	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">浴室の床と天井</div> No.36～38, 53～55 (6 カ所 12 本)	—
基礎立上り	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">1 階外壁脚部</div> No.1～4 (4 カ所 8 本)	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">1 階バルコニー下の壁脚部</div> No.5 (1 カ所 2 本)	—	—

表中の No.は図 3.3.1-2～3.3.1-6 の調査位置 No.に対応。( ) 内は，はつりカ所数および鉄筋本数。

表 3.3.1-4 はつり調査位置における仕上げ材の種類

	屋 外	屋 内	
	雨がかり有・無 共通	水がかり有 (浴室)	水がかり無
耐力壁	モルタル仕上げ +色モルタル吹付 +リシン吹付	モルタル仕上げ +タイル貼り	プラスター塗り +クロス貼り
スラブ	床/防水モルタル仕上げ  天井/モルタル仕上げ +リシン吹付	床/アスファルト防水 +防水モルタル仕上げ  天井/合成樹脂エナメル塗り のフレキシブルボード	—
基礎 立上り	モルタル仕上げ	—	—

表 3.3.1-5 含水率測定用の乾式コアの両端面における環境条件

部材	コア両端面における環境条件	採取位置	本数
耐力壁	屋外・雨がかり有りー屋内・水がかり無し	①～④	16
	屋外・雨がかり無しー屋内・水がかり無し	⑤	4
	屋外・雨がかり無しー屋内・水がかり有り	⑥	4
スラブ	屋外・雨がかり有りー屋外・雨がかり有り	⑦～⑨	9

### 3.3.2 調査結果

#### (1) はつり位置における中性化深さ

中性化深さ  $d_c$  (mm) の平均値と標準偏差を部材別および環境条件別に表 3.3.2-1 に示す。耐力壁の中性化深さ  $d_c$  の度数分布を、屋外側および屋内側別に図 3.3.2-1 および図 3.3.2-2 に示す。平均値が一番大きいのは屋内側の耐力壁で 52.3 mm、中性化速度係数にすると 7.2 mm/√年で、屋外側に比べて明らかに中性化進行が速いと言える。屋内側の耐力壁は居室であるため、人間が排出する CO<sub>2</sub> によって他の調査位置より CO<sub>2</sub> 濃度が高かったためと考えられる。一方、屋内側のスラブは平均値 5.2 mm であった。これは調査位置が浴室であるため、アスファルト防水と防水モルタルが施されており、湿潤環境であり、かつ仕上げ材による中性化抑制効果が大きかったためと考えられる。屋外側の耐力壁について雨がかりの有無で比較すると、モルタル仕上げの厚さが異なるので単純に比較はできないが、雨がかり有りは 0~70 mm 超の範囲に広く分布しているのに対して、湿潤環境になりにくい雨がかり無しでは 30 mm 未満のデータはなかった。なお、いずれの部材・環境条件でも変動係数にするとおおよそ 50~100% の範囲にあり、ばらつきが大きかった。

表 3.3.2-1 中性化深さの測定結果

	耐力壁		スラブ		基礎	全体
	屋外	屋内	屋外	屋内	屋外	
データ数	38	24	7	6	5	80
平均値 (mm)	38.8	52.3	28.7	5.2	27.8	38.7
標準偏差 (mm)	22.0	24.6	15.7	5.7	22.8	24.6

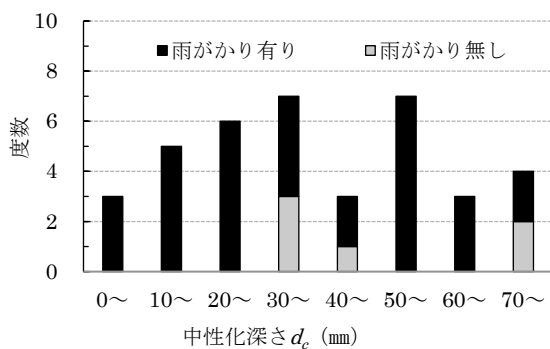


図 3.3.2-1 屋外側耐力壁の中性化深さ

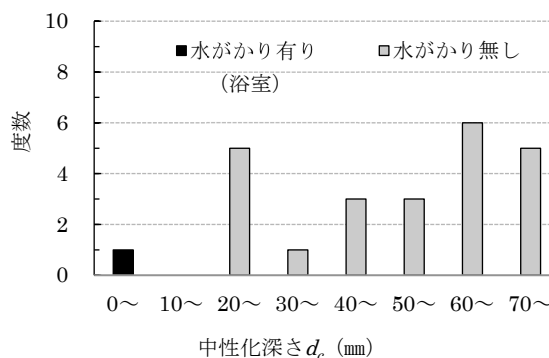


図 3.3.2-2 屋内側耐力壁の中性化深さ

## (2) かぶり厚さ

かぶり厚さ  $D$  (mm) の平均値と標準偏差を部材別および環境条件別に表 3.3.2-2 に示す。また、屋外側の耐力壁およびスラブ下端筋のかぶり厚さ  $D$  の度数分布を図 3.3.2-3～3.3.2-4 に示す。屋外側のスラブの鉄筋は 20 mm未満のデータが 70%, 屋外側の耐力壁では 30 mm未満のデータが 46% 程度あり、鉄筋位置の施工精度は良くない状況であった。なお、1～3 階の耐力壁の鉄筋は複配筋であるが、4 階の耐力壁は図面上、一部が単配筋である。単配筋の鉄筋については、測定したかぶり厚さ  $D$  が小さくなるほうの側の環境条件（屋外・屋内）に分類した。

表 3.3.2-2 かぶり厚さの測定結果

	耐力壁		スラブ		基礎	全体
	屋外	屋内	屋外	屋内	屋外	
データ数	96	48	50	12	10	216
平均値 (mm)	35.4	44.6	13.6	20.7	54.7	32.5
標準偏差 (mm)	23.0	18.4	13.4	12.8	25.2	23.1

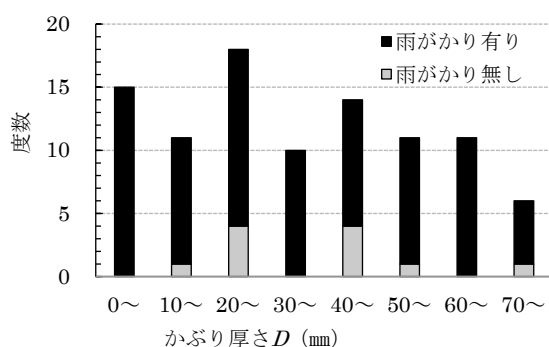


図 3.3.2-3 屋外側耐力壁のかぶり厚さ

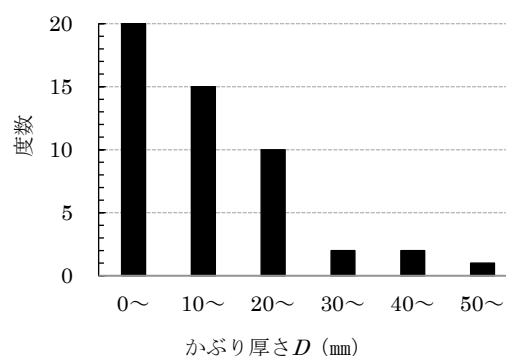


図 3.3.2-4 屋内側耐力壁のかぶり厚さ

## (3) 鉄筋の腐食状況

かぶり厚さ  $D$  と腐食グレードの関係および中性化深さ  $d_c$  とかぶり厚さ  $D$  の差 ( $d_c - D$ ) の数値と腐食グレードとの関係をそれぞれ部材別・環境条件別に図 3.3.2-5～3.3.2-14 に示す。

各図中には腐食グレードごとの鉄筋本数を記載した。なお、各鉄筋は、 $d_c - D < 0$  の場合は未中性化領域に、 $d_c - D \geq 0$  の場合は中性化領域に存在するとみなすことにする。また、調査位置で確認された鉄筋の種類および径を表 3.3.2-3 に示す。鉄筋種類は丸鋼で、呼び径 9～16 mm であった。以下、部材別・環境条件別に考察する。

表 3.3.2-3 使用されていた鉄筋種類および呼び径

部材	耐力壁	スラブ	基礎立上り
鉄筋種類・呼び径	丸鋼 9, 13, 16 mm	丸鋼 9, 13 mm	丸鋼 9, 16 mm

a) 屋外側の耐力壁

調査本数は全 96 本である。腐食グレードの最大はIVで、その多くは図 3.3.2-5 に示すように  $D$  が 30 mm未満の鉄筋である。中性化領域の鉄筋は図 3.3.2-6 に示すように 56 本あり、うち 25 本が腐食グレードIVであった。一方で、中性化領域の鉄筋でも腐食が軽微なものもあり、腐食グレードII以下が 21 本あった。これらは、調査位置 No.6, 10, 12, 13, 15, 17, 18, 39, 40, 44, 60, 64, 72, 74, 76 および 78 にある鉄筋で、部位などの偏りは特に見られなかった。しかし、中性化領域にある鉄筋で雨がかり無しに限定すれば、7 本中 6 本（調査位置 No.17, 18, 64 および 78）がグレードII以下であり、中性化領域にあっても雨がかり無しでは、鉄筋が腐食しにくい傾向にあった。

未中性化領域の鉄筋は図 3.3.2-6 に示すように 40 本あり、うち 36 本が腐食グレードII以下で腐食は軽微であった。しかし、 $d_e - D$  が -5 mm程度の未中性化領域の範囲では腐食グレードIVが 3 本（調査位置 No.16, 63, 75）確認された。例として、調査位置 No.16 のはつり前後の状況を写真 3.3.2-1 に示す。試験体による実験では、フェノールフタレイン法によって計測した  $d_e$  より 6~8 mm深い部分が鉄筋腐食限界とする報告<sup>3-8)</sup>があるが、これと同様の事象であった。

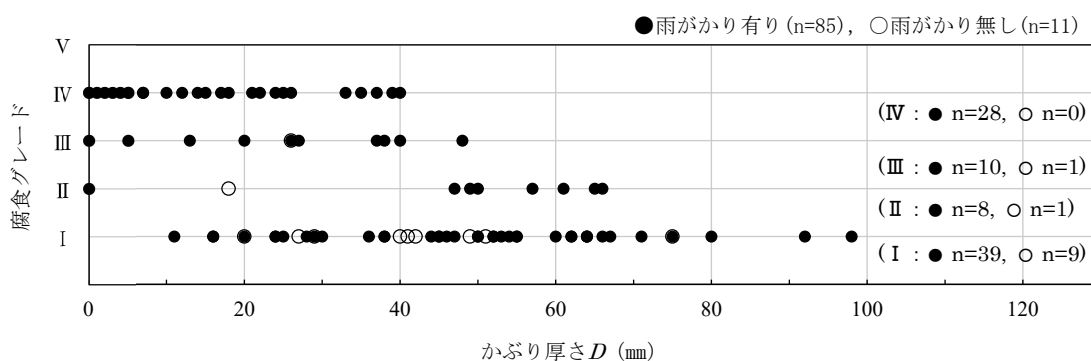


図 3.3.2-5 屋外側耐力壁のかぶり厚さと腐食グレード

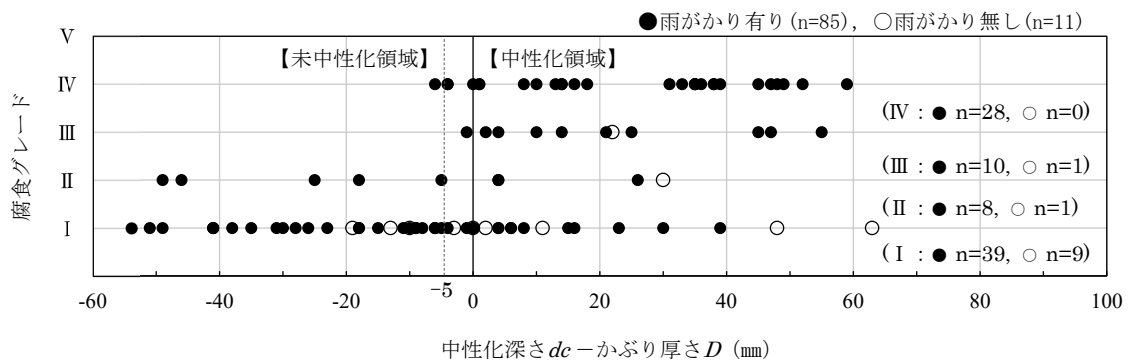


図 3.3.2-6 屋外側耐力壁の中性化深さとかぶり厚さの差と腐食グレード

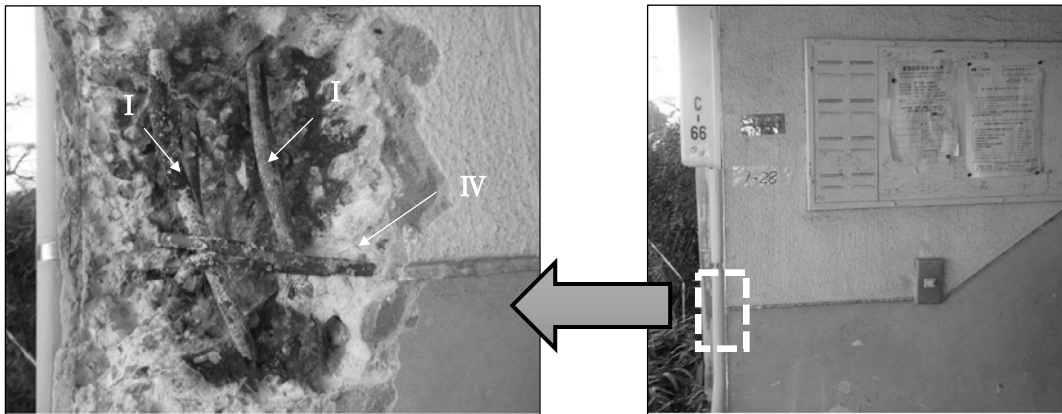


写真 3.3.2-1 調査位置 No. 16 のはつり状況と鉄筋腐食グレード

b) 屋内側の耐力壁

調査本数は全 48 本である。かぶり厚さ  $D$  は図 3.3.2-7 に示すように 30 mm 以上が多いが、図 3.3.2-3 および図 3.3.2-4 に示すように中性化が屋外に比べて全体的に深く進行しており、中性化領域の鉄筋は図 3.3.2-8 に示すように 25 本あった。しかし、その多くは、腐食グレード II 以下で、 $d_c \cdot D$  の大小に関わらず、腐食は大きく進行していなかった。なお、中性化領域にある鉄筋の腐食グレードの最大は III で、3 本あるが、全体に占める割合としては少ない。これらは調査位置 No.49, 65 および 67 の鉄筋で、うち調査位置 No.49 および 67 は、腰窓開口サッシ中央部の直下であった。この位置は、打設時にコンクリートが密実に充填されにくい場合があり、またサッシ取付け

部から雨水が浸透する可能性がある。例として、調査調査 No.49 のはつり前後の状況を写真 3.3.2-2 に示す。また、屋内で水がかりとなる浴室の壁は腐食グレード I であった。湿潤環境であり、かつタイル仕上げが施されているので、中性化進行が抑制されたためと考えられる。

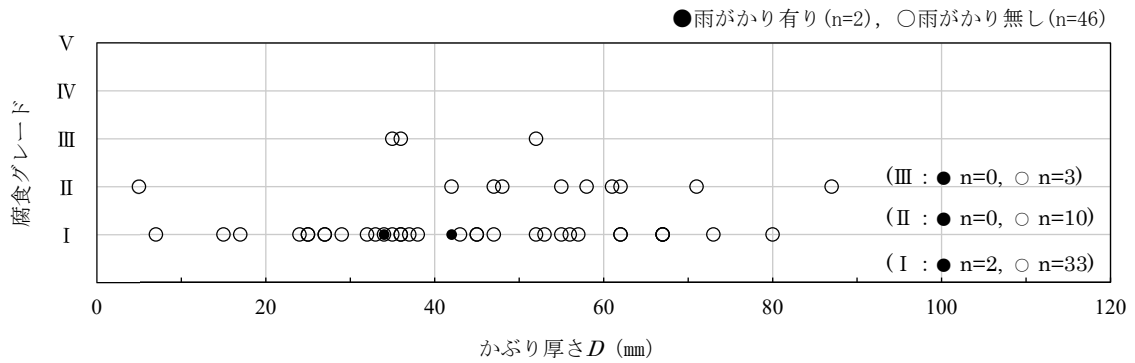


図 3.3.2-7 屋内側耐力壁のとかぶり厚さと腐食グレードの関係

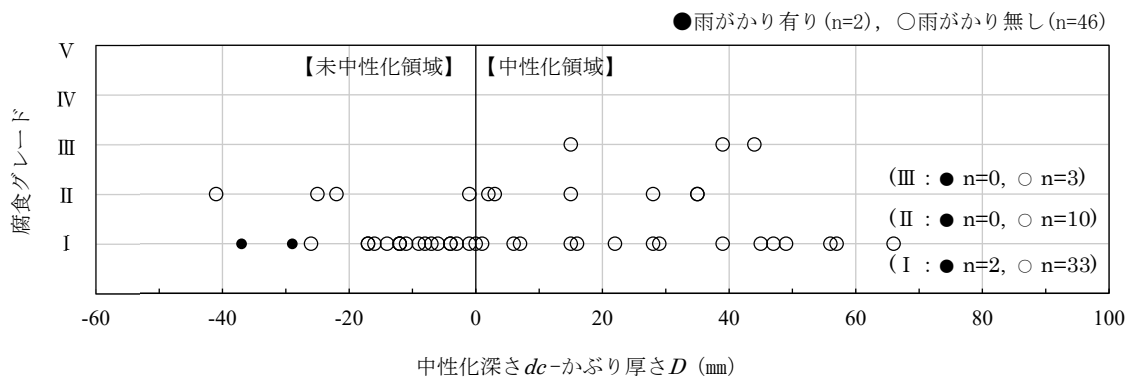


図 3.3.2-8 屋内側耐力壁の中性化深さとかぶり厚さの差と腐食グレード

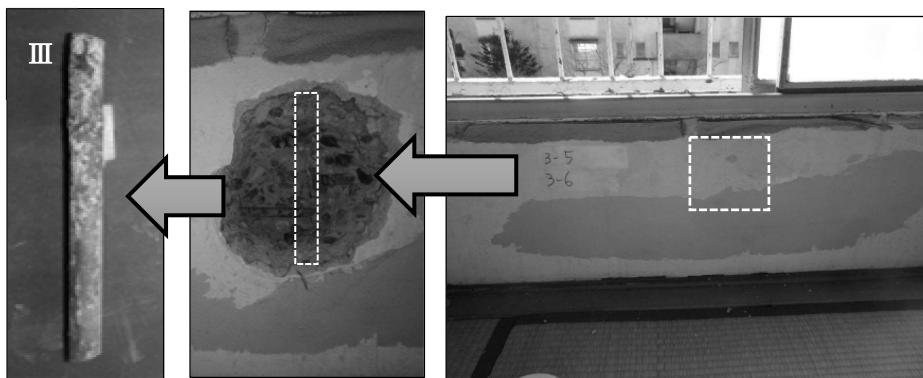


写真 3.3.2-2 調査位置 No. 49 のはつり状況と鉄筋腐食グレード

c) 屋外側のスラブ

調査本数は全 50 本で、スラブの下端筋である。図 3.3.2-5 および図 3.3.2-9 に示すように全体的にかぶり厚さ  $D$  が小さいこともあり、図 3.3.2-10 に示すように中性化領域の鉄筋が多く 46 本あった。腐食グレードの最大は V で 4 本あったほか、IV も 34 本あり、腐食が最も進行していた部材・環境条件である。例として、調査位置 No.33 ののはつり前後の状況を写真 3.3.2-3 に示す。

当該部位は屋外に張り出している水平面材で、特に軒先周辺は雨がかりしやすいことに加えて、排水溝や水切り目地があり、鉄筋のかぶり厚さが確保されにくいなど、鉄筋が腐食しやすい条件がそろっている箇所と考えられる。図 3.3.2-11 に例として示すような軒先から鉄筋位置までの離隔距離とその鉄筋の腐食グレードとの関係を図 3.3.2-12 に示す。軒先からの離隔距離が 200 mm までは腐食グレード IV 以上であったが、200 mm 以降ではバルコニーの元端側に行くに従い、一部に腐食グレード I ~ III の鉄筋が見られた。

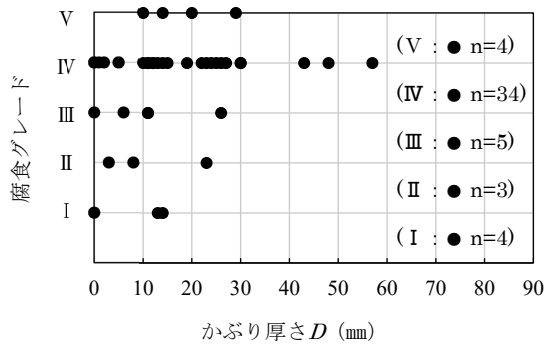


図 3.3.2-9 屋外側スラブのかぶり厚さ

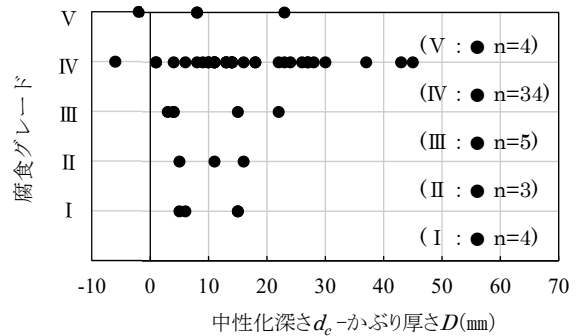


図 3.3.2-10 屋外側スラブの中性化深さとかぶり厚さの差と腐食グレードと腐食グレード

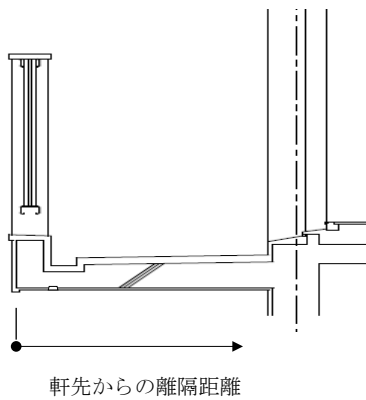


図 3.3.2-11 バルコニーを例に示した軒先からの離隔距離

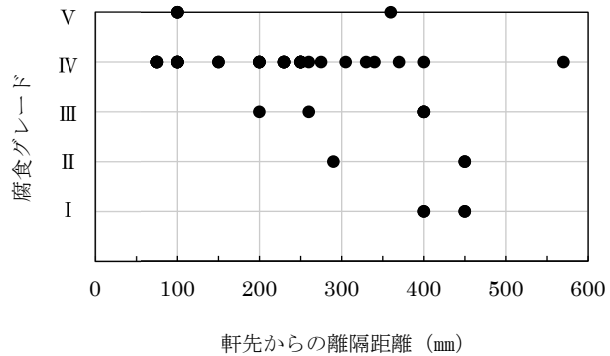


図 3.3.2-12 軒先からの離隔距離と腐食グレードの関係



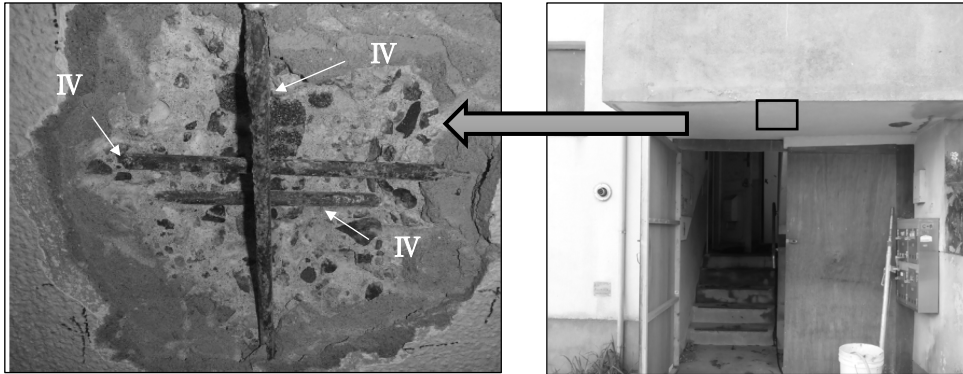


写真 3.3.2-3 調査位置 No. 33 のはつり状況と鉄筋腐食グレード

d) 屋内側のスラブ（浴室）

調査本数は全 12 本で、浴室の上端筋と下端筋である。調査状況の一例として、調査位置 No. 55（床）のはつり前後の状況を写真 3.3.2-4 に示す。図 3.3.2-13 に示すように、かぶり厚さ  $D$  が小さい鉄筋が屋外側のスラブ同様あるものの、図 3.3.2-14 に示すようにほとんどの鉄筋が未中性化領域にあり、腐食グレードも最大の II が 1 本あるのみで、残りは I であった。

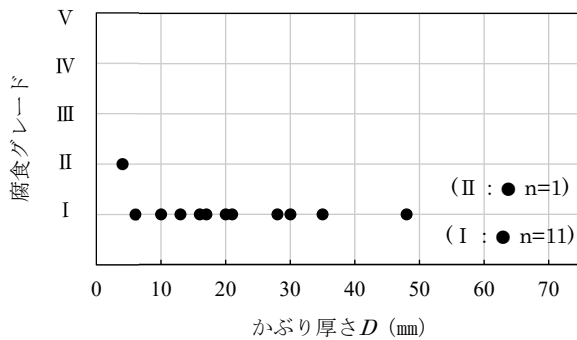


図 3.3.2-13 屋内側スラブのかぶり厚さと腐食グレード

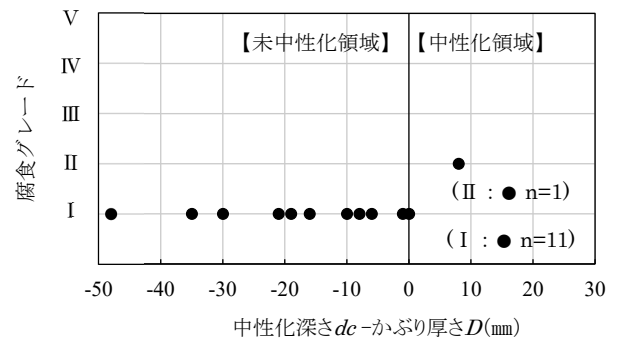


図 3.3.2-14 屋内側スラブの中性化深さとかぶり厚さの差と腐食グレード

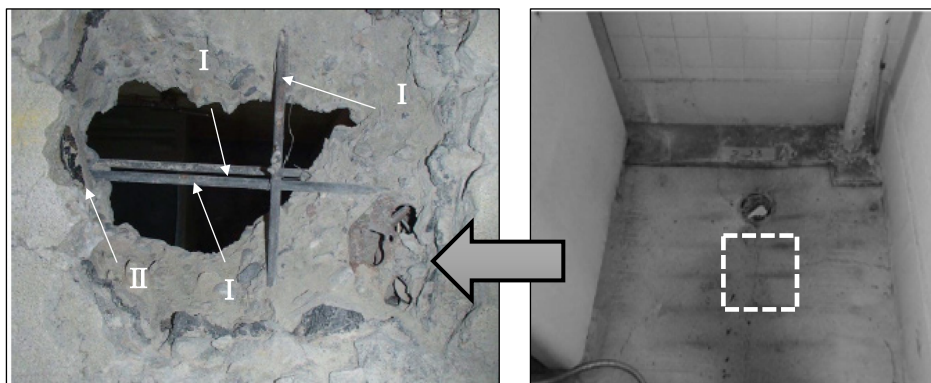


写真 3.3.2-4 調査位置 No. 55 のはつり状況と鉄筋腐食グレード

e) 基礎立上り

調査本数は全 10 本で、主筋とせん断補強筋である。図 3.3.2-15 に示すように基礎立上りは、他の部位に比べてかぶり厚さ  $D$  が確保されており、図 3.3.2-16 に示すようにほとんどの鉄筋が未中性化領域にあった。腐食グレードの最大はⅢで、中性化領域にある 2 本であった。当該鉄筋が確認された調査位置 No.2 のはつり前後の状況を写真 3.3.2-5 に示す。当該位置は換気口の隅角部にあたり、外観からは確認できなかったが、コンクリートにひび割れが生じやすい部分であり、その場合には雨水が浸透する可能性がある位置であった。

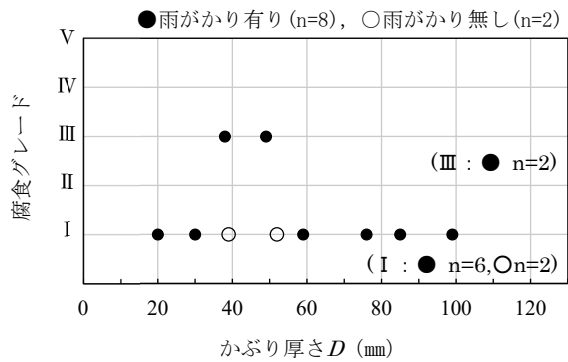


図 3.3.2-15 基礎立上りのかぶり厚さと腐食グレード

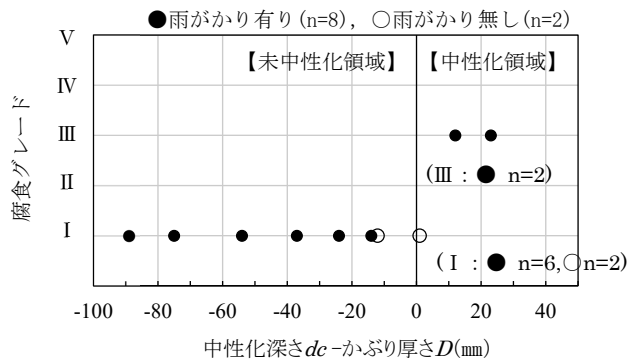


図 3.3.2-16 基礎立上りの中性化深さとかぶり厚さの差と腐食グレード

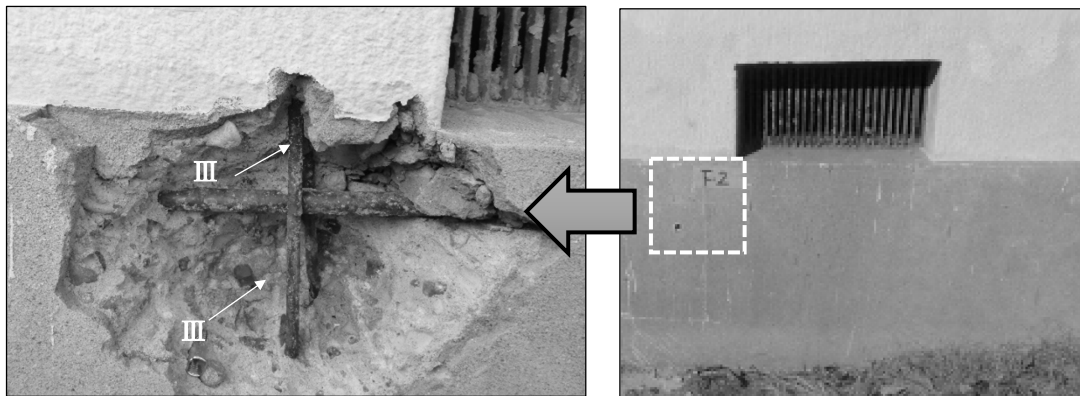


写真 3.3.2-5 調査位置 No. 2 のはつり状況と鉄筋腐食グレード

## (2) モルタル仕上げの影響

コンクリート表面に施されているモルタル仕上げが、鉄筋腐食の進行に及ぼす影響について検討した。検討対象は、屋外側の耐力壁で、中性化領域の鉄筋 56 本である。モルタル仕上げの厚さおよびかぶり厚さ  $D$  と腐食グレードとの関係を図 3.3.2-17 に示す。かぶり厚さ  $D$  が 0 の位置は、鉄筋がコンクリートとモルタルの境界面に存在している状態である。ほとんどの鉄筋はかぶり厚さ  $D$  が 0~50 mm、モルタル厚さが 10~40 mm の間にあった。傾向としては、モルタル厚さの大小に関係なく、腐食グレードは I~IV まで分布しており、かぶり厚さ  $D$  が小さい範囲でも同様であった。今回調査した建築物の外壁に施されていたモルタル仕上げには、中性化領域にある鉄筋の腐食進行を抑制するような効果はなかったと考えられる。

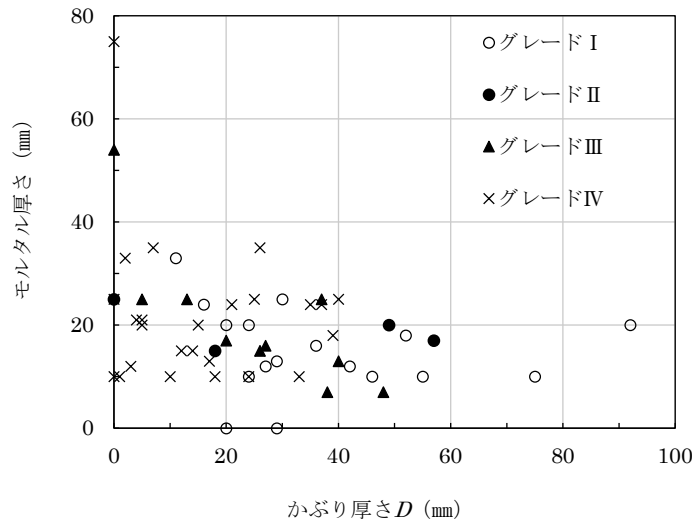


図 3.3.2-17 モルタル仕上げの厚さおよびかぶり厚さと腐食グレードの関係

## (3) モルタル仕上げ表面の劣化状況との関係

モルタル仕上げ表面における劣化の有無を目視確認できた調査位置 71 カ所（調査位置 No.39, 40, 41, 56~58, 63, 72 および 74 を除く）の鉄筋 199 本について、劣化状況と腐食グレードの関係を表 3.3.2-4 に示す。ここで、「補修痕」とは、モルタル仕上げおよびかぶりコンクリートのはく離・はく落に対するモルタル補修が過去に行われたものと推定される箇所を示し、表面塗装の違いから判断した。モルタル仕上げ下層にあるコンクリートのひび割れについては、はつりによる破壊調査であったために確認できていない。また、調査時点において鉄筋の錆汁は、スラブ

天井面の極めてわずかな範囲に見られたのみであった。

結果は、補修痕が見られない位置では、ひび割れの有無、その幅の大小に関わらず、腐食グレードⅠ～Ⅳまでの鉄筋が確認された。腐食グレードⅣの場合には、軽微なものも含めてひび割れが生じている場合が多かった。また、特に劣化事象が見られない場合には、その多くは腐食グレードⅠであった。しかし、0.2 mm以上のひび割れがある場合にも割合としては、腐食グレードⅠが多く、これはモルタル仕上げ部分のみの劣化であったと推測される。ひび割れ有りは、ひび割れ無しに比べて鉄筋腐食が進行している傾向にあるが、そのひび割れ幅の大小と腐食グレードの関係は明確には関連づけられなかった。

また、補修痕が見られる位置にあった鉄筋は、ひび割れの有無に関わらず腐食グレードⅢ以上、その多くが腐食グレードⅣで、一部に腐食グレードⅤがあった。補修を行う時点で鉄筋がある程度、腐食していたと考えられるが、腐食グレードⅤの鉄筋を除去することなくそのまま存置してモルタル補修を行った可能性は低く、補修後に腐食グレードⅤまで進行したと推定される。鉄筋腐食が原因と考えられる過去に補修済みの箇所でも、その補修後も更に鉄筋腐食が進行していた可能性がある。

表 3.3.2-4 劣化事象の状況と腐食グレードごとの鉄筋本数

仕上げ表面の劣化事象	腐食グレード					計
	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ	
特になし	68	11	10	2	0	91
0.2 mm未満のひび割れあり	22	9	6	15	0	52
0.2 mm以上のひび割れあり	9	1	1	3	0	14
補修痕がある	0	0	2	28	4	34
補修痕に0.2 mm以上のひび割れあり	0	0	0	8	0	8
計	99	21	19	56	4	199

#### (4) コンクリートの含水率との関係

コンクリートの含水率と鉄筋腐食の関係については、供試体による実験<sup>3-9)</sup>や実建築物での報告<sup>例えば、3-10)</sup>がある。ここでは、部材別・環境条件別に質量含水率を測定し、その傾向を確認した。なお、含水率測定用コアの採取前に本格的な降雨があったのは約2週間前であった。

##### a) 耐力壁における屋内側と屋外側雨がかり有りとの比較

図 3.3.2-18 に、図 3.3.1-7 の①～④に示す位置でそれぞれ各階1本計4本ずつ採取したコアの測定結果を示す。片方のコア端面が屋外側雨がかり有りで、もう片方が屋内側水がかり無しである。屋内側の鉄筋腐食状況は、図 3.3.2-8 に示すように中性化領域にある鉄筋でもほとんどは腐食グレードⅡ以下であったが、そこでの質量含水率は1.2～3.0% (平均1.7%) であった。屋内側は水が供給されない位置になるので、乾湿の変動は少なく、この質量含水率の数値は安定していると考えられる。

一方、屋外側の質量含水率は1.1～5.2%であり、屋内側に比べて高めであるが、数値にはばらつきがあった。ばらつきの傾向としては、方位別の平均値で、北面(図 3.3.2-18 中の位置④)および東面(同③)が3.0%前後と高く、西面(同①)および南面(同②)が1.5%前後と低いことから、降雨によって水が供給された後の乾燥の速さが方位によって違いがあり、日射が影響していると考えられる。屋外側雨がかり有りは、腐食グレードⅣまで確認されたが、腐食に影響があると考えられる降雨時の湿潤状態における質量含水率は、本調査では未確認である。しかし、降雨がない日が続いた状態でも質量含水率が最大5%程度あることから、降雨時には5%以上の質量含水率になること、そして、特に西面と南面は乾湿の変動の幅が比較的大きいことなどが想定される。

これらのことより、屋内側水がかり無しと屋外側雨がかり有りでは、質量含水率で3～5%を境にした環境条件の違いがあることが推定され、鉄筋の腐食進行の違いに影響している可能性が考えられる。

##### b) 屋外側耐力壁の雨がかり無しと雨がかり有りとの比較

図 3.3.2-19 に、図 3.3.1-7 の②および⑤に示す位置でそれぞれ各階1本計4本ずつ採取したコアの測定結果を示す。雨がかり有りが②、雨がかり無しが⑤で、採取した方位は同じ南面である。屋外側雨がかり無しの鉄筋腐食状況は、図 3.3.2-6 に示すように中性化領域にある鉄筋でもその

ほとんどは腐食グレードⅡ以下であったが、そこでの質量含水率は、1.1～1.5%であった。南面の雨がかり無しなので、比較的乾燥していたと考えられる。降雨時においても他から雨水が浸透してこないことが前提であるが、屋内側同様に乾燥状態が保持されやすかったために、鉄筋の腐食進行が抑制されていた可能性が高い。なお、雨がかり有りの質量含水率の方が若干高めであるが、最大で1.7%程度で大きな差でなく、降雨後、表層で乾燥が進めば、ほぼ同じ乾湿状態になるようである。ただし、表層40mm以深では雨がかり無しが1.3～1.7%であるのに対して、雨がかり有りは1.4～2.8%であり、乾燥がしにくい内部では雨がかり有りの質量含水率は相対的に高く保たれていた。

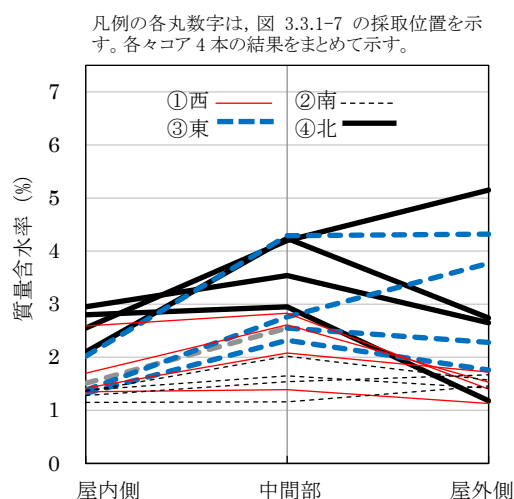


図 3.3.2-18 耐力壁の屋内側と屋外側雨がかり有りとの含水率分布の比較

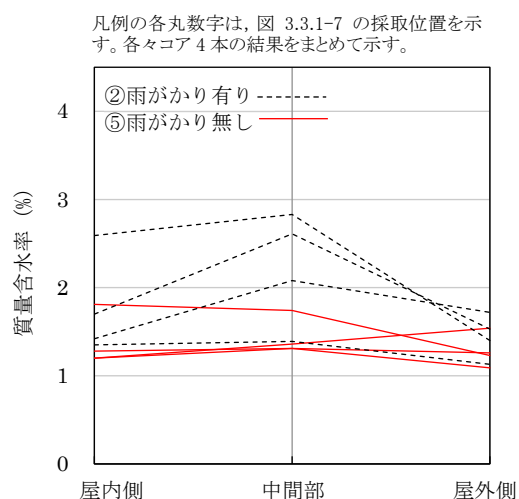


図 3.3.2-19 屋外側耐力壁における雨がかり無しと雨がかり有りとの含水率分布の比較

### c) 屋内側水がかり有りの耐力壁の状況

図 3.3.2-20 に、図 3.3.1-7 の⑥に示す位置で各階 1 本計 4 本を採取したコアの測定結果を示す。場所は浴室である。屋内側の質量含水率は、2.5～4.5%の範囲にあり、a) で述べた屋内側水がかり無しと比べて高めの傾向であった。浴室として使用されていたのは調査の 6 ヶ月程前までにも関わらず数値が高いのは、換気が少ない空間であること、透水性が低いタイル仕上げが施されており水分が蒸発しにくかったことなどが理由としてあげられる。なお、屋外側は雨がかり無しで 2.3%以下であり、屋内側の湿潤状態が裏側の表層部分まで及ぶ影響は少ないようである。

屋内側の鉄筋は未中性化領域に存在し、腐食グレードⅡ以下であった。コンクリート中に水が供給されやすい環境であったが、未中性化領域にあることで、鉄筋は腐食が進行しなかったと考

えられる。

#### d) 屋外側雨がかり有りのスラブの状況

図 3.3.2-21 に、図 3.3.1-7 の⑦～⑨に示す位置で各 3 本計 9 本を採取したコアの測定結果を示す。場所はバルコニーおよび外部階段室である。床側の質量含水率は、4.9～9.6%の範囲にあり、調査位置で最も高めであった。一方、天井側は 0.8～2.5%の範囲にあり、大きな差がある。床側の仕上げは 40 mm以上の防水モルタルが施されており、浸透した水がコンクリート床表面から蒸発しにくいのに対して、天井側の仕上げは透水性の高いリシン吹付であり、水が抜けやすかったことなどがその原因として考えられ、既往の報告<sup>3-11)</sup>と同様の傾向であった。

天井側となるスラブ下端の鉄筋は中性化領域に存在し、そのほとんどが腐食グレードIV以上であった。a) で述べた屋外側雨がかり有りの耐力壁の場合と同様に、腐食に影響があると考えられる降雨時の湿潤状態における質量含水率は、本調査では未確認である。しかし、降雨時に天井側まで水が浸透した場合には、屋外側耐力壁同様に天井側も 5%以上の質量含水率に一時的になること、乾湿の変動の幅が比較的大きいことなどが想定される。施工の結果、かぶり厚さが確保されていない鉄筋が多くあったことに加えて、これらの環境条件が要因となって、鉄筋の腐食が大きく進行したと考えられる。

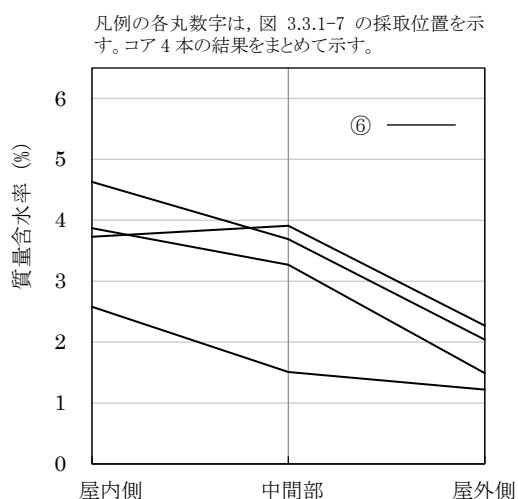


図 3.3.2-20 水がかり有りの屋内側耐力壁における含水率分布

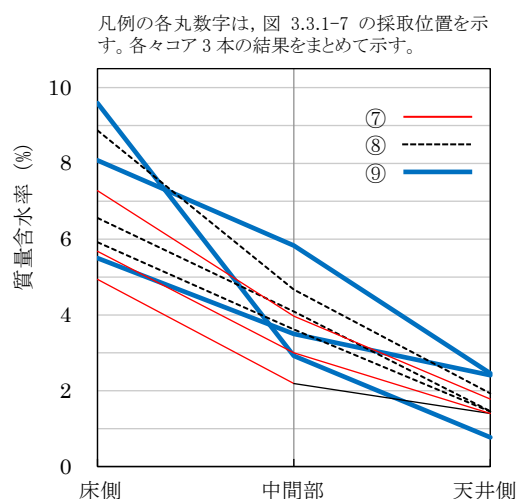


図 3.3.2-21 雨がかり有りの屋外側スラブの含水率分布

### 3.4 まとめ

本章では、解体除却予定の築後 53 年を経過した現場打ち壁式 RC 造の集合住宅 1 棟を利用して、通常では実施が困難な多数の調査数量に基づく調査を行い、鉄筋腐食状況の把握ならびに鉄筋腐食が生ずる要因を検討するために中性化深さ、かぶり厚さ、仕上げ材の塗厚およびコンクリートの含水率などの測定を実施して、個別建築物における劣化の実態を詳細に把握した。

また、築後 48～49 年を経過した現場打ち壁式 RC 造の集合住宅 2 棟において、建築物の一般的な耐久性調査で実施される調査数量に基づいて、中性化深さの測定などをあわせて実施した。

結論を以下に示す。

- (1) 外壁における方位別の中性化深さの比較では、3 棟とも調査数量に関わらず全体的な傾向として北面より南面が進行していた。基礎床下は、打放し仕上げであるため、モルタル仕上げが施された外壁に比べて、全体的に中性化が進行していた。
- (2) モルタル仕上げの塗厚とコンクリートの中性化深さに基づいて解析で求めたモルタル仕上げの中性化速度係数  $A_m$  は 5.5～17.7 (mm/√年) と非常に幅がある結果になった。
- (3) 鉄筋の腐食が進行しているのは、中性化領域にあり、かつ屋外側で雨がかり有りの環境条件の場合であった。腐食グレードが高い鉄筋が占める割合が多いが、一方で腐食が軽微なものもあった。
- (4) 屋外側で雨がかり有りの部位におけるコンクリートの質量含水率は、1.1～5.2%であり、方位別の平均値では、北面および東面が 3.0%前後と高く、西面および南面が 1.5%前後と低い。降雨によって水が供給された後の乾燥の速さが方位によって違いがあり、日射が影響していると考えられる。本調査結果が、降雨がない日が続いた条件下における測定値から判断すると、降雨時では、5%以上になることが想定される。
- (5) 屋外側もしくは屋内側の中性化領域に鉄筋があっても、雨（水）がかり無しの環境条件では、中性化深さの大小に関わらず腐食は軽微で進行していなかった。雨（水）がかり無しの部位におけるコンクリートの質量含水率は 3%以下であった。



## 参考文献

- 3-1) 日本住宅公団：建築工事共通仕様書（昭和 38 年版）， pp.21-22, 1963
- 3-2) 日本住宅公団：建築工事共通仕様書（昭和 41 年版）， pp.28-29, 1966
- 3-3) 長谷川拓哉ほか 1 名：文献調査に基づく屋外の中性化進行予測，コンクリート工学年次論文集， vol.28, No.1, pp.665-670, 2006
- 3-4) 春畑仁一ほか 2 名：既存鉄筋コンクリート造建築物のコンクリート材料調査における圧縮強度と中性化深さの統計，その 1，その 2，日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1, pp.549-552, 2011.8
- 3-5) 李榮蘭ほか 1 名：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報告集，第 649 号， pp.499-504, 2010.3
- 3-6) 馬場明生ほか 1 名：各種の表層面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， Vol.9, No.1, pp.333-338, 1987
- 3-7) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の耐久性調査・診断および補修指針（案）・同解説， p.44, 1997
- 3-8) 岸谷孝一ほか 1 名：コンクリート中の鉄筋の腐食に関する研究，その 1，日本建築学会構造系論文集，第 283 号， pp.11-16, 1979.9
- 3-9) 山本佳城ほか 2 名：中性化したコンクリートの含水状態が鉄筋腐食に及ぼす影響，日本建築学会構造系論文集，第 576 号， pp.15-21, 2004.2
- 3-10) 古賀一八ほか 2 名：高濃度塩化物イオン含有 RC 建築物の含水率および鉄筋腐食調査，コンクリート工学年次論文集， vol.30, No.1, pp.783-788, 2008
- 3-11) 白石聖ほか 3 名：実構造物調査に基づく部位別の乾燥条件と中性化の関係，2013 年度日本建築学会関東支部研究報告集 I， pp.105-108, 2014.2

## 第4章 実建築物の打放しコンクリート部分における中性化の実態と評価

### 4.1 はじめに

本章では、建築物における打放しコンクリート部分を対象にして、中性化に環境条件が及ぼす影響の実態を把握し、その定量的な評価を行うために、まずコア採取による圧縮強度および中性化深さの測定ならびに実建築物の躯体表面における温度・相対湿度の実測などの調査を行った。ここで、打放しコンクリートに限定したのは、仕上げ材や補修材の塗重ねの違いによる中性化抑制効果の違いなどの不確定要素を取り除いた条件で検討するためである。次に、調査で得られた圧縮強度と中性化深さから算出した中性化速度係数のデータを、試料の採取位置および測定面ごとに屋外・床下別および方位別に分類し、採取位置および測定面における環境条件の違いを温度・相対湿度を指標として、それらの違いが中性化深さの差異に及ぼす影響を分析した。具体的には、実建築物調査で求めた環境条件別の中性化速度係数の比率と、実環境で実測した温度・相対湿度を適用して算出した中性化速度係数の補正係数<sup>4)</sup>の比率との比較を行い、実建築物の中性化速度に及ぼす影響の要因分析と温度・相対湿度を指標として評価する手法についての検討を行った。

### 4.2 調査方法

#### 4.2.1 コア供試体を採取した建築物の概要

本章で調査対象とした実建築物およびコンクリートコア供試体の概要を表 4.2.1-1 に示す。建築物は、関東・近畿・東海地域にある2～5階建てのRC造集合住宅である。その多くが整形な平面・立面形状で、南面にバルコニー、北面に階段室があり、建築物の長さに相違があるがほぼ類似の形状である。当該建築物の大規模修繕工事を行う際の2003～2010年にかけて、コンクリート躯体の健全性を確認することを目的にコア供試体を採取し、圧縮強度や中性化深さの測定を行っている。その中から、打放し部分で採取したコア供試体のデータを抽出したが、採取部位は、結果的に屋外に露出している基礎立上り部分に限定された。該当した建築物は1210棟あり、基礎立上りから採取したコア供試体は各棟1本であったため、分析対象コア供試体本数は1210本である。当該建築物の竣工年は図 4.2.1-1 に示す1964～1994年、中性化深さ測定時の竣工からの経過年数は図 4.2.1-2 に示す15～44年で、この経過年数の15年目と34年目前後にピークが見られるのは、1回目および2回目の大規模修繕工事の多くがこの周期で行われたことによる。

表 4.2.1-1 調査対象とした建築物およびコンクリートコア供試体

項目	水準
構造種別・用途	鉄筋コンクリート造集合住宅
階数	地上2～5階
棟数	1210棟
地域	関東（東京，千葉，埼玉，神奈川，茨城）， 近畿（大阪，京都，奈良，兵庫）， 東海（愛知，三重）
竣工年	1964～1994年
試験時の経過年数	15～44年
設計基準強度	16.5, 18, 21 (N/mm <sup>2</sup> ) *1
コンクリートの種類	普通コンクリート
セメントの種類	普通ポルトランドセメント
コア採取部位	屋外に露出している基礎立上り部分
仕上げ材	基礎立上り両側面ともになし（打放し）
コア供試体本数	1210本
方位	東面（140本），西面（813本），南面（7本）， 北面（21本），不明（229本）
環境条件	屋外（東・西・南：雨がかりあり・日射あり， 北：雨がかりあり・日射なし） 床下（雨がかりなし・日射なし・多湿）
分析データ数 n	屋外（1210データ），床下（673データ）

(\*1 建設時は kg/cm<sup>2</sup>であるが，変換係数 10 で SI 単位表記にした。)

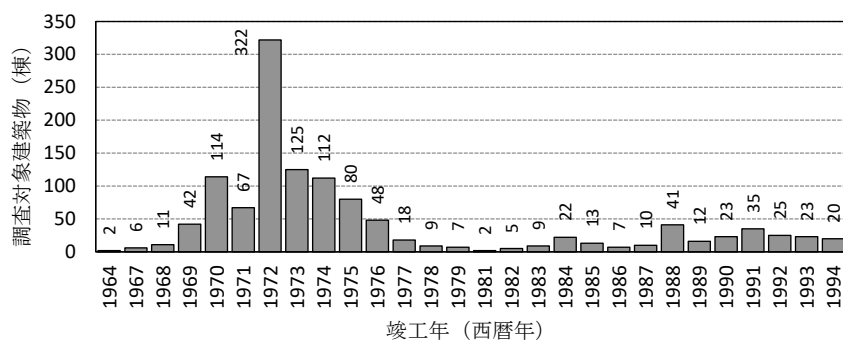


図 4.2.1-1 竣工年の分布

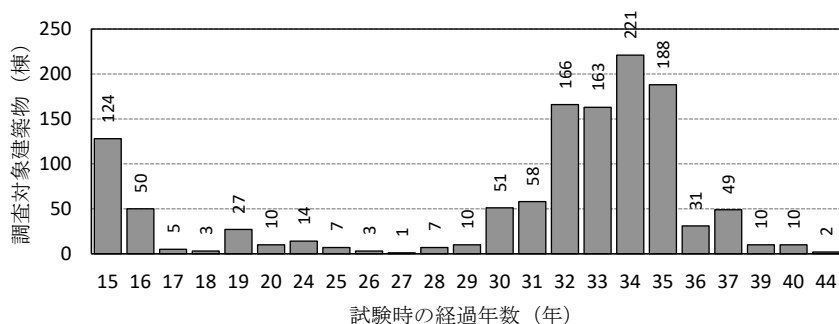


図 4.2.1-2 試験時の経過年数の分布

#### 4.2.2 コア供試体の採取位置および採取方法

コア供試体の採取位置の模式図を図 4.2.2-1 に示す。部位は地表面より高さ 500mm 程度屋外に露出している基礎立上り部分で、採取位置はコアドリルで採取する作業空間を考慮すると低くても地表面より 300mm 程度の高さになる。採取位置の上部に庇がある場合でも 2m 以上は離れるため、直接の雨がかりになる位置である。一方で、地表面での雨の跳ね返りがかかることも考えられるが、地表面から 300mm 程度の高さの位置であればその可能性は低い<sup>4)2)</sup>。

コア採取は、原則、屋外側から作業を行い、部材を貫通してコアを採取した。しかし、部材断面内で鉄筋と干渉した場合などは、強度試験に必要とするコア供試体長さを確保できているのであれば、途中で折り取って、中性化の測定は片面のみで行った。

貫通コアにおける採取側先端は、そのほとんどが床下に該当する。床下地表面は、土、敷砂利およびコンクリートなど建築物ごとに様々である。床下の環境条件は、基礎立上りにある換気口から外気の流入があるため、CO<sub>2</sub>濃度は屋外と同じとみなせるが、雨がかりと日射はない。また、屋外に比べて床下は、相対湿度が 6~12% 高く、月平均で 90% 近くになる場合もあり結露も生ずるという報告例<sup>4)3)</sup>、<sup>4)4)</sup>がある。日射もないので、湿潤環境は保たれ易い条件にあると言える。

方位別のコア供試体本数は、表 4.2.1-1 に示すように西面が中心で、南面および北面は少ない。これは、中性化の進行は日射を受け乾燥しやすい南面や西面が速いとされる報告<sup>4)5)</sup>があり、本研究で分析対象としたコア供試体の本来の採取目的が建築物個別に行った健全性調査であったため、比較的中性化の進行が速く、かつコア採取作業がしやすい西面を中心に採取方位を選定していたことによる。また、南面の本数が少ない理由は、通常、集合住宅の南面にはバルコニーがあることが多く、バルコニーが取付く基礎立上りでのコア採取作業が困難なためである。なお、対象建築物のほとんどが、離棟間隔を確保して配置される団地内の建築物であるため、東面・西面・南面の屋外に露出している基礎立上りのコア採取表面は基本的に日射面と見なすことができる。

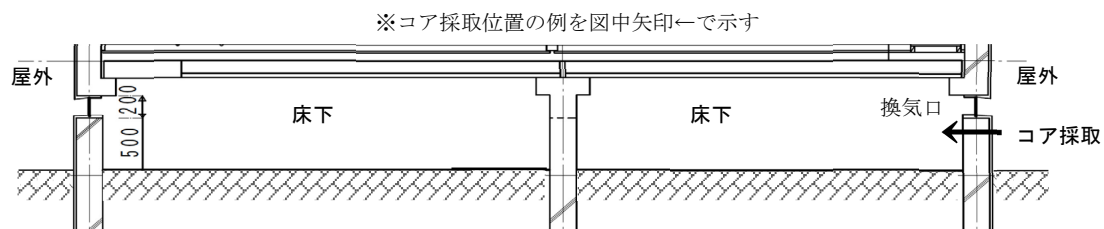


図 4.2.2-1 コア採取位置の模式図

#### 4.2.3 圧縮強度の試験方法および中性化深さの測定方法

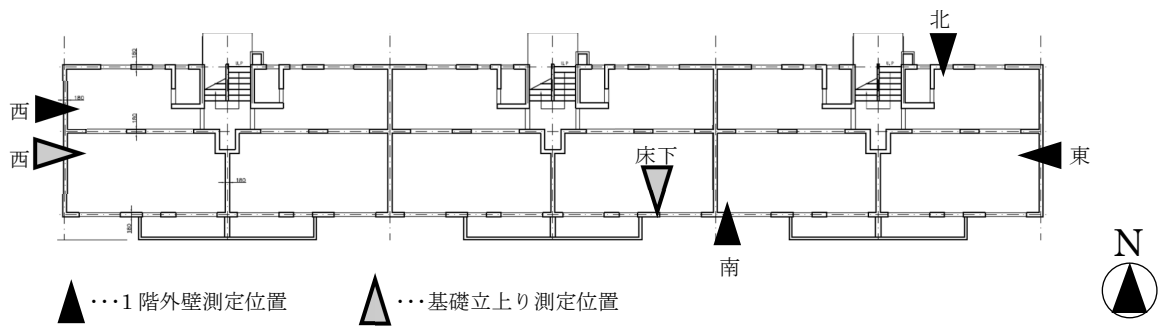
コンクリートの圧縮強度試験方法は、JIS A 1107 に準拠している。中性化深さの測定は、JIS A 1152 に準拠しているが、コア供試体は圧縮強度試験用と兼用しているため、コア採取後にコンクリート表面からの距離をマーキングしてから圧縮強度試験を行い、コア供試体を割裂させた後に、フェノールフタレイン 1%溶液を割裂面に噴霧して測定している。コア 1 本あたりの中性化深さのデータは、貫通コアの場合で屋外側と床下側の 2 データ、折り取りコアの場合で屋外側の 1 データである。なお、分析対象とした建築物の建設時におけるコンクリートの調合計画書や 28 日圧縮強度試験結果などは残されていないため、水セメント比や 28 日圧縮強度は不明である。なお、セメントの種類は設計図書より普通ポルトランドセメントであることを確認している。

#### 4.2.4 実建築物における温度・相対湿度の実測概要

実建築物のコンクリート壁の表面やその内部における温度および相対湿度を実測した報告例としては、東西南北にある各壁の表面および内部で 20 日間計測したデータ<sup>46)</sup>や南面および室内の壁内部で 2 ヶ月間計測したデータ<sup>47)</sup>など限定的なものでしかない。そこで、本検討では、表 4.2.1-1 に示す調査対象とほぼ類似の建築物の 1 階の外壁表面近傍および基礎立上り部側面の屋外西面と床下側で実測した雰囲気温度および相対湿度を用いることとする。基礎立上り部の屋外側について西面で実測したのは、表 4.2.1-1 に示すように西面の中性化データが多いからである。温度・相対湿度を実測した建築物の概要を表 4.2.4-1 に、測定位置を図 4.2.4-1~4.2.4-3 に、使用した温湿度データロガーを写真 4.2.4-1 に、計測状況の例を写真 4.2.4-2 に示す。

表 4.2.4-1 温度および相対湿度を計測した建築物概要

項目	内容
所在地・竣工年	埼玉県・1963 年
階数・構造種別	地上 5 階建て鉄筋コンクリート造集合住宅
外壁仕上げ材	モルタル仕上げの上リシン吹付（色は白系統）
測定項目	温度，相対湿度
測定方法	温湿度データロガーで 1 時間ごとに自動計測
測定位置	・東西南北の外壁表面近傍（G.L.+約 1.5m） ・基礎立上り部 屋外西面・床下側（G.L.+約 0.5m）
測定期間	2016.2.3~2017.1.27



屋外

図 4.2.4-1 温度・相対湿度の測定位置（平面図）

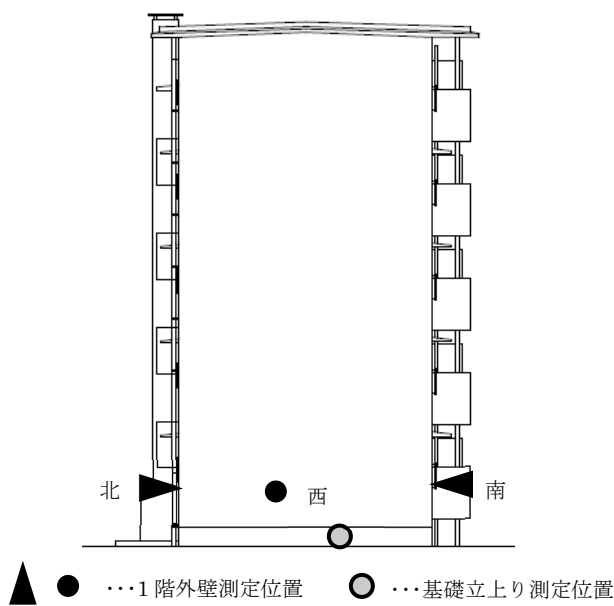


図 4.2.4-2 温度・相対湿度の測定位置  
（西側立面図）

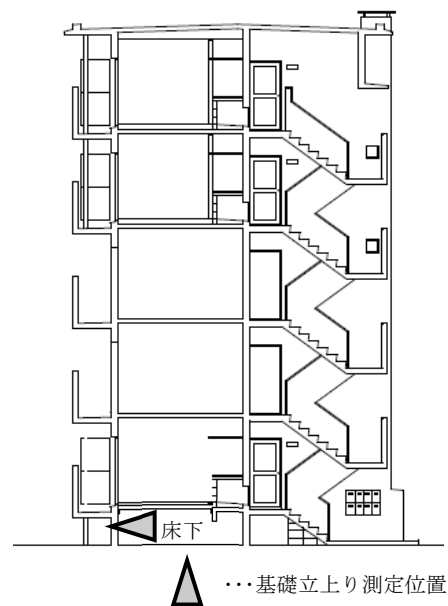


図 4.2.4-3 温度・相対湿度の測定位置  
（南北方向断面図）



写真 4.2.4-1 温湿度データロガー  
（(株)佐藤計量器製作所 データロガー記憶計 温度湿度 SK-L200TH II α）



写真 4.2.4-2 計測状況の例

外壁のコンクリート面の仕上げは、モルタル仕上げの上にリシン吹付で、色は白系統である。地盤面+1.5m 程度の高さの外壁表面および地盤面+0.5m 程度の高さの基礎立上り部梁側面の屋外西側と床下側に設置した温湿度データロガーによって、温度および相対湿度を 1 時間ごとに自動計測した。なお、表 4.2.1-1 に示す中性化深さを測定した建築物の所在地（東京都・埼玉県・京都府・大阪府・兵庫県）の最近点の气象台 5 地点（東京・熊谷・京都・大阪・神戸）で 1981～2010 年に観測された気温および相対湿度の全平均値の範囲<sup>4-8)</sup>は、15.4～16.9℃、64～67%で建設地域間に大きな差はない。

#### 4.2.5 分析方法

##### （1）環境条件，方位および地域別の中性化速度係数

一般に、実環境におけるコンクリートの中性化深さ  $d_N$  は中性化期間  $t_N$  の平方根に比例するとされており、次式で表される。

$$d_N = A_N \sqrt{t_N} \quad (4.2.5-1)$$

ここで、 $d_N$ ：実環境下のコンクリートの中性化深さ（mm）

$A_N$ ：実環境下の中性化速度係数（mm/√年）

$t_N$ ：中性化期間（年），とする。

測定した中性化深さ  $d_N$  と竣工から中性化深さ測定時までの中性化期間  $t_N$  を用いてコアごとに求めた各中性化速度係数  $A_N$  を、環境条件（屋外・床下），方位（東・西・南・北）および地域（関東・近畿・東海）の各組合せで区分し、最小二乗法による回帰式の定数としてそれぞれ中性化速度係数  $A_N$  を算出した。

##### （2）圧縮強度と中性化速度係数の関係

中性化速度係数  $A_N$  は、コンクリートの圧縮強度  $\sigma_{CN}$  と相関性が高いことがこれまでも多く報告されている。中性化速度係数  $A_N$  と圧縮強度  $\sigma_{CN}$  の関係については、式（4.2.5-2）に示すような圧縮強度  $\sigma_{CN}$  に反比例するという提案<sup>4-9)</sup>や式（4.2.5-3）に示すような圧縮強度  $\sigma_{CN}$  の平方根に反比例するという提案<sup>4-10)</sup>などがある。コアごとに求めた中性化速度係数  $A_N$  と当該コアにおける圧縮強度  $\sigma_{CN}$  を用いて、式（4.2.5-2）および式（4.2.5-3）の定数  $a$ 、 $b$  を最小二乗法による回帰式でそれぞれ算出した。また、屋外暴露試験の結果に基づく既往式との比較を行った。

$$A_N = a(1/\sigma_{CN} - b) \quad (4.2.5-2)$$

$$A_N = a(1/\sqrt{\sigma_{CN}} - b) \quad (4.2.5-3)$$

ここで、 $A_N$ ：実建築物の中性化速度係数（mm/√年）

$\sigma_{CN}$ ：実建築物のコンクリートの圧縮強度（N/mm<sup>2</sup>）

$a$ 、 $b$ ：定数，とする。

### （3）温度・相対湿度が中性化速度に及ぼす影響

温度・相対湿度が中性化速度に及ぼす影響としては、温度・相対湿度をパラメータとした促進中性化試験における中性化深さの差異の結果に基づいて提案された補正式<sup>4-1)</sup>があり、温度については式（4.2.5-4）、相対湿度については式（4.2.5-5）である。

$$\beta_1 = (T + 27.3) / 47.3 \quad (4.2.5-4)$$

ここで、 $\beta_1$ ：中性化深さに関する温度の影響係数

$T$ ：温度（℃），とする。

式（4.2.5-4）は、温度 20℃の場合に対する中性化速度の比として算出される影響係数である。

$$\beta_2 = H_u(100 - H_u)(140 - H_u) / 192000 \quad (4.2.5-5)$$

ここで、 $\beta_2$ ：中性化深さに関する相対湿度の影響係数

$H_u$ ：相対湿度（%），とする。

式（4.2.5-5）は、相対湿度 60%の場合に対する中性化速度の比として算出される影響係数である。40%のときに最大になり、それより大きくても小さくても係数は小さくなる。

これらは、コンクリートの耐久設計<sup>4-1)</sup>において用いる温度・相対湿度による補正係数の求め方の根拠としても引用されているが、実環境における中性化深さの差異に対する評価に適用した検討事例は多くはない。本研究では、前節で述べた実建築物で実測した各環境条件における温度・相対湿度を用いて、それらの差異が中性化速度に与える影響を式（4.2.5-4）および式（4.2.5-5）より算出した各環境条件における影響係数の比率として表すことにし、実建築物調査で求めた環境条件別の中性化速度係数の比率と比較することで、これらの式を適用することの妥当性の確認も含めて検討を行った。



### 4.3 調査結果および考察

#### 4.3.1 中性化に及ぼす圧縮強度の影響

表 4.3.1-1 に、屋外・床下別、方位別（東・西・南・北）および地域別（関東・近畿・東海）の各組合せによる区分の中性化速度係数  $A_N$  とそのデータ数  $n$  を示す。また、西面・全地域の中性化速度係数  $A_N$  を 1 として基準化した場合のそれぞれの中性化速度係数  $A_N$  に対する倍率を  $\alpha$  とし示す。ここで、地域と方位を区分しないで取り扱った場合は、それぞれ「全地域」、「全方位」と表記した。図 4.3.1-1 に、屋外・床下別および方位別の各組合せによる区分の中性化期間  $t_N$  と中性化深さ  $d_N$  のデータをプロットし、それぞれ回帰式により求めた中性化速度係数  $A_N$  を示す。全方位のデータには、方位が不明なデータも含まれている。図 4.3.1-1 に示すように、各区分とも全体的に中性化期間  $t_N$  の経過に伴い、中性化深さ  $d_N$  が大きくなる傾向が現れている。中性化期間  $t_N$  は 15 年目と 34 年目前後のデータ数が多いが、中性化深さ  $d_N$  のばらつきの幅は 34 年目前後の方が大きい。中性化速度係数  $A_N$  は、 $1.35\sim 5.53\text{mm}/\sqrt{\text{年}}$  の幅がある。

表 4.4.1-2 に、表 4.3.1-1 の区分に対応した圧縮強度  $\sigma_{cN}$  の平均値、標準偏差およびコア本数  $n$  を示す。なお、床下の中性化深さの測定はコア全数ではないが、屋外は全数で測定しているため、屋外の欄に記載している圧縮強度の数値がコア全数を代表する値である。図 4.3.1-2 に、コアごとに求めた中性化速度係数  $A_N$  と当該コアにおける圧縮強度  $\sigma_{cN}$  を屋外・床下別および方位別の図にプロットした結果を示す。表 4.3.1-3 および表 4.3.1-4 には、中性化速度係数  $A_N$  と圧縮強度  $\sigma_{cN}$  の関係式である式 (4.2.5-2) および式 (4.2.5-3) の定数  $a$ 、 $b$  を最小二乗法の回帰式で各々求めた結果と  $R^2$  値を示す。また、図 4.3.1-2 には、あわせて式 (4.2.5-2) および式 (4.2.5-3) の回帰式を破線および実線で、長谷川らの提案<sup>4-12)</sup>によるコンクリートの 28 日標準養生圧縮強度  $\sigma_{c28}$  と屋外暴露試験結果の中性化速度係数  $A_N$  に基づいた関係式 (4.3.1-1) を点線で示した。

$$A_N = 23.8(1/\sqrt{\sigma_{c28}} - 0.11) \quad (4.3.1-1)$$

建設時の設計基準強度は  $16.5\sim 21\text{N}/\text{mm}^2$  の範囲にあるのに対して、圧縮強度  $\sigma_{cN}$  は表 4.3.1-2 に示すように全体の平均値で  $31.2\text{N}/\text{mm}^2$  あり、設計基準強度を大きく上回っている。中性化速度係数  $A_N$  では方位別の違いが明確に表れたが、圧縮強度  $\sigma_{cN}$  はデータ数の多い東面と西面を比べるとほぼ同じである。地域間の違いに着目すると、平均値が最も大きい近畿が  $32.1\text{N}/\text{mm}^2$ 、最も小さい東海が  $29.3\text{N}/\text{mm}^2$  とその差は  $3\text{N}/\text{mm}^2$  未満である。標準偏差は、東海が一番大きく  $7.90\text{N}/\text{mm}^2$  である。

表 4.3.1-1 屋外・床下, 方位および地域の各組合せによる区分の各中性化速度係数  $A_N$  (mm/ $\sqrt{\text{年}}$ )

		全方位 <sup>*1</sup>			東 面			西 面			南 面			北 面		
		$A_N$	$\alpha^{*2}$	n	$A_N$	$\alpha^{*2}$	n	$A_N$	$\alpha^{*2}$	n	$A_N$	$\alpha^{*2}$	n	$A_N$	$\alpha^{*2}$	n
屋 外	全地域	4.16	0.98	1210	3.91	0.92	140	4.25	1	813	5.53	1.30	7	3.31	0.78	21
	関東	4.44	1.04	600	4.07	0.96	74	4.34	1.02	419	5.40	1.27	5	4.72	1.11	5
	近畿	3.86	0.91	511	3.75	0.88	55	4.20	0.99	307	4.29	—	1	2.61	0.61	16
	東海	3.99	0.94	99	3.60	0.85	11	4.00	0.94	87	6.79	—	1	—	—	0
床 下	全地域	2.89	0.68	673	3.08	0.72	119	3.00	0.71	363	3.00	0.71	3	1.35	0.32	19
	関東	2.80	0.66	220	2.47	0.58	55	2.84	0.67	83	2.25	—	1	0.34	0.08	3
	近畿	2.93	0.69	367	3.76	0.88	54	3.10	0.73	205	1.34	—	1	1.65	0.39	16
	東海	2.97	0.70	86	3.24	0.76	10	2.91	0.68	75	4.67	—	1	—	—	0

(\*1 全方位には, 方位が不明なデータも含まれている。 \*2 表中の $\alpha$ は西面・全地域の $A_N$ を1として基準化した場合の倍率を示す。)

表 4.3.1-2 屋外・床下, 方位および地域の各組合せによる区分の各圧縮強度  $\sigma_{CN}$  (N/mm<sup>2</sup>)

		全方位 <sup>*1</sup>			東 面			西 面			南 面			北 面		
		$\sigma_{CN}$ 平均	標準 偏差	n	$\sigma_{CN}$ 平均	標準 偏差	n	$\sigma_{CN}$ 平均	標準 偏差	n	$\sigma_{CN}$ 平均	標準 偏差	n	$\sigma_{CN}$ 平均	標準 偏差	n
屋 外	全地域	31.2	6.96	1210	31.6	6.90	140	31.2	7.00	813	29.6	5.50	7	34.5	5.60	21
	関東	30.8	6.72	600	31.8	7.00	74	31.3	6.80	419	29.5	2.30	5	27.6	4.90	5
	近畿	32.1	6.90	511	32.1	6.90	55	31.6	7.00	307	39.3	—	1	36.7	3.80	16
	東海	29.3	7.90	99	27.5	3.30	11	29.6	8.30	87	20.0	—	1	—	—	0
床 下	全地域	31.3	7.03	673	31.3	6.58	119	31.1	7.30	363	28.1	8.14	3	35.3	5.19	19
	関東	29.7	6.24	220	30.5	6.37	55	29.6	6.36	83	25.2	—	1	27.8	5.27	3
	近畿	32.7	6.86	367	32.4	6.89	54	32.1	6.97	205	39.3	—	1	36.7	3.80	16
	東海	29.7	8.23	86	27.4	3.48	10	30.0	8.60	75	20.0	—	1	—	—	0

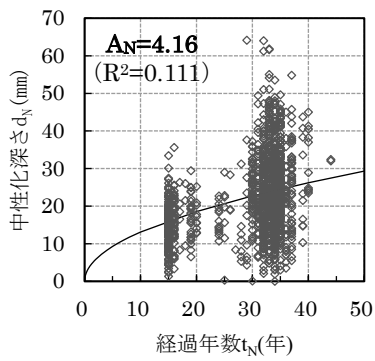
(\*1 全方位には, 方位が不明なデータも含まれている。)

表 4.3.1-3 圧縮強度と中性化速度係数の図 4.3.1-2 に示す各関係における回帰式(4.2.5-2)の定数

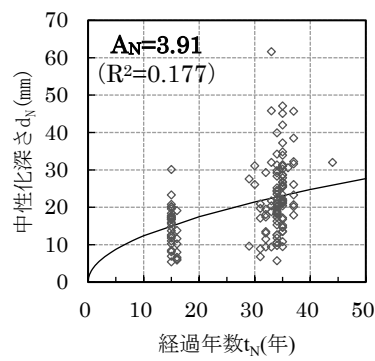
	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)	(h)	(i)	(j)
定数 a	152	116	153	156	280	138	111	144	131	47.5
定数 b	0.006	0.000	0.006	0.000	0.019	0.013	0.007	0.014	0.017	0.000
R <sup>2</sup> 値	0.423	0.173	0.464	0.405	0.571	0.335	0.164	0.395	0.882	0.003

表 4.3.1-4 圧縮強度と中性化速度係数の図 4.3.1-2 に示す各関係における回帰式(4.2.5-3)の定数

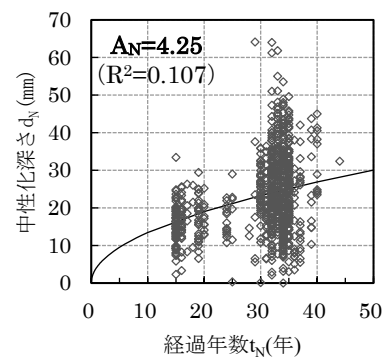
	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)	(h)	(i)	(j)
定数 a	56.1	32.4	56.5	39.6	104	50.8	41.1	53.4	49.1	8.4
定数 b	0.109	0.062	0.108	0.046	0.142	0.128	0.111	0.129	0.138	0.000
R <sup>2</sup> 値	0.415	0.151	0.456	0.416	0.582	0.329	0.171	0.384	0.851	0.002



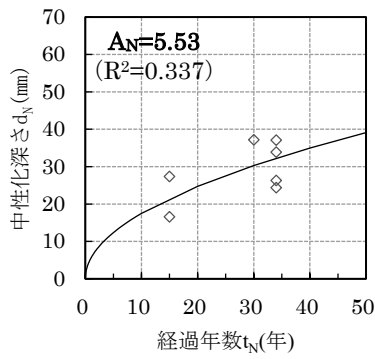
(a) 屋外・全地域・全方位



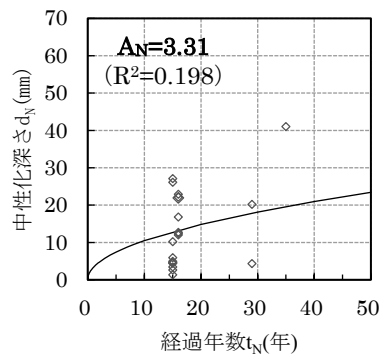
(b) 屋外・全地域・東



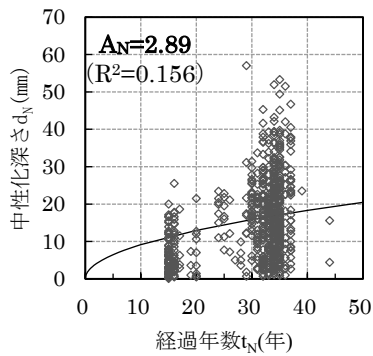
(c) 屋外・全地域・西



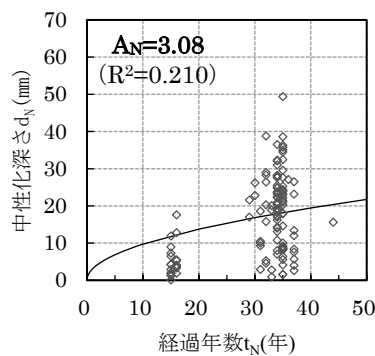
(d) 屋外・全地域・南



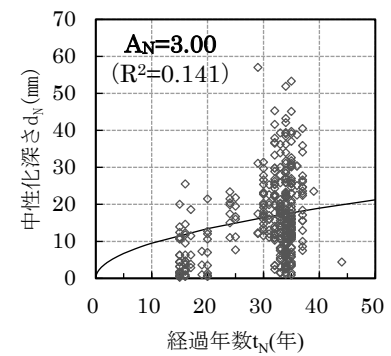
(e) 屋外・全地域・北



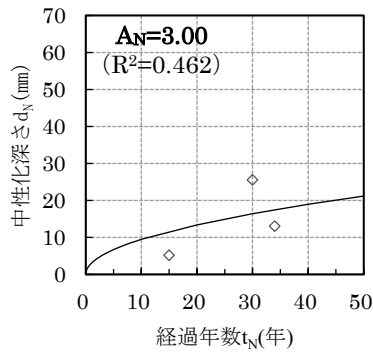
(f) 床下・全地域・全方位



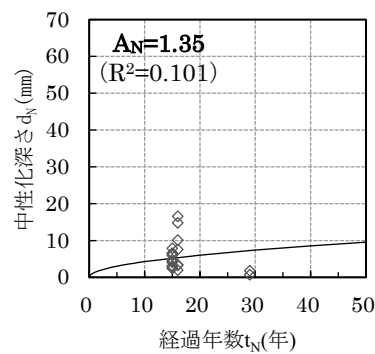
(g) 床下・全地域・東



(h) 床下・全地域・西



(i) 床下・全地域・南



(j) 床下・全地域・北

図 4.3.1-1 経過年数と中性化深さの関係

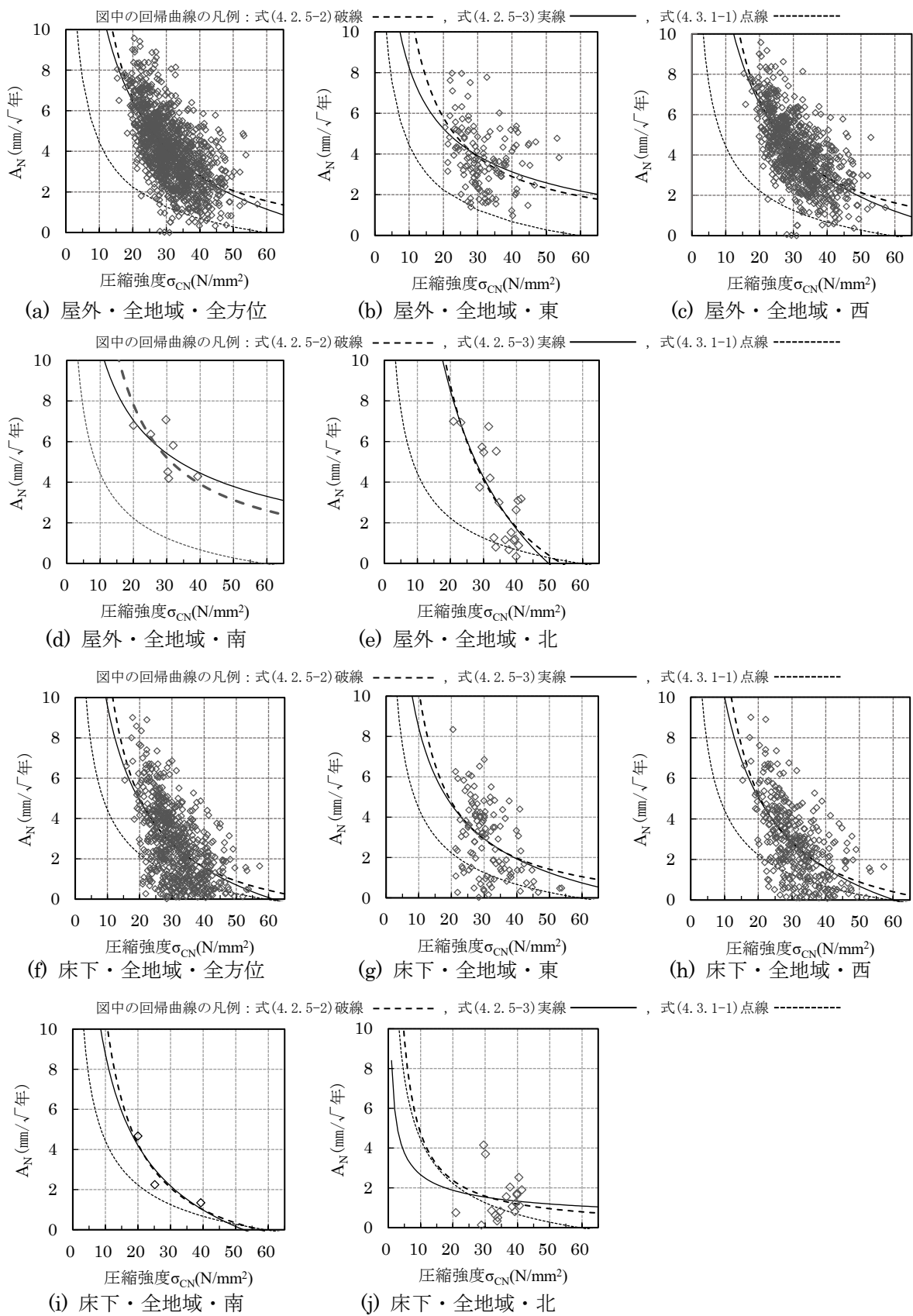


図 4.3.1-2 圧縮強度と中性化速度係数  $A_N$  の関係

図 4.3.1-2 に示す中性化速度係数  $A_N$  と圧縮強度  $\sigma_{CN}$  の関係は、ばらつきが見られるものの全体的には圧縮強度  $\sigma_{CN}$  が大きくなるほど中性化速度係数  $A_N$  が小さくなる傾向が認められる。図 4.3.1-2 (a) ~ (e) の屋外に比べて、図 4.3.1-2 (f) ~ (j) の床下のデータは全体的に中性化速度係数  $A_N$  の小さい位置にプロットされ、 $30\text{N/mm}^2$  付近から中性化速度係数  $A_N$  がほぼ 0 に近いデータもある。実環境では、中性化速度係数  $A_N$  は強度に依存するだけではなく、湿度などの他の要因が強度との関係以上に中性化の進行に影響を与えている場合があることが伺える。

式 (4.2.5-2) および式 (4.2.5-3) の回帰式の適用について比較すると、図 4.3.1-2 で示す 10 ケースの図のうち、(a) ~ (c), (f), (h) ~ (j) の 7 ケースにおいて、式 (4.2.5-2) の方が極めて若干の差であるが高い相関性を示し、全体的に、実建築物の中性化速度係数  $A_N$  は圧縮強度  $\sigma_{CN}$  に反比例するとした考え方を適用する方が良い結果を示した。データ数が増加すると、特に  $20\text{N/mm}^2$  付近において中性化速度係数  $A_N$  の値が大きい側にばらつくデータが多くなり、この傾向に対する適合が式 (4.2.5-2) の方が相対的に良いことが関係していると思われる。なお、 $50\text{N/mm}^2$  以上については、データ数が少ないため、その範囲における適用の精度には課題が残る。

また、実建築物における圧縮強度  $\sigma_{CN}$  と中性化速度係数  $A_N$  との各関係式と屋外暴露試験による式 (4.3.1-1) の比較では、図 4.3.1-2 に示すように、いずれの環境条件においても実建築物の中性化速度係数  $A_N$  の方が大きい傾向にあり、同一強度で見ると 2~3 倍程度大きいことは春畑らの報告<sup>4-13)</sup>と同様である。また、同一の中性化速度係数  $A_N$  で見た場合で比較すると、例えば、図 4.3.1-2 (a) や (f) における中性化速度係数  $A_N=4\text{mm}/\sqrt{\text{年}}$  において、 $15\sim 30\text{N/mm}^2$  以上の圧縮強度の開きがある。この中性化速度係数  $A_N$  の違いは、実建築物の構造体と暴露試験供試体における施工条件や養生条件の違いに起因するほか、本分析に用いた圧縮強度  $\sigma_{CN}$  は築 15 年以上経過した建築物の構造体から採取したコア圧縮強度であるのに対して、式 (4.3.1-1) の算出では標準養生供試体による材齢 28 日圧縮強度  $\sigma_{c28}$  を用いていることから、評価するコンクリート強度の材齢に違いがあることも影響していると思われる。

以上、本項では、中性化速度係数  $A_N$  と圧縮強度  $\sigma_{CN}$  の関係について多くのデータに基づいてその実態を示し、既往式を適用した評価を行った。しかし、採取データの条件に偏りがあること、 $50\text{N/mm}^2$  以上のデータ数が少ないことなどが課題である。今後、様々な環境条件で、その数値指標をあわせて記録した上で多くの中性化データを収集し、さらに総括的に検討する必要がある。

### 4.3.2 中性化に及ぼす方位および温湿度の影響

#### (1) 各方位の中性化傾向

方位別の中性化傾向に関しては、前述の表 4.3.1-1 に示すように、屋外・全地域において、南面 > 西面 > 東面 > 北面の順で中性化速度係数  $A_N$  が大きいとの結果が得られた。中性化速度係数  $A_N$  が一番小さい北面を基準にした各方位の中性化比率およびデータ数が十分にある西面と東面の中性化比率を表 4.3.2-1 に示す。中性化速度係数  $A_N$  の方位別の平均値の幅は、南面と北面の  $5.53 \sim 3.31 \text{mm}/\sqrt{\text{年}}$  で 1.67 倍である。データ数が十分にある西面と東面における中性化速度係数  $A_N$  の比率は 1.09 (=4.25/3.91) 倍で、既往文献の報告例<sup>4)5)</sup>における 1.22 倍より若干小さかった。一方、床下における中性化速度係数  $A_N$  の大小関係は、表 4.3.1-1 によれば、南面 ≒ 西面 ≒ 東面 > 北面、であり、北面を除いて屋外のように方位別の差異が明確に現れていないため、このことは逆に、屋外の方位別の中性化速度係数  $A_N$  に影響を及ぼしている要因が日射量の違いやそれに伴う温度・湿度の違いであることの裏付けにもなっている。なお、方位別のデータ数に偏りがあるため推論になるが、北面のみ中性化速度係数  $A_N$  が小さい理由として、床下では相対的に北面の湿润環境が高いが、東面・南面・西面の間では比較的その差は小さいことが考えられる。

表 4.3.2-1 基礎立上りの屋外各方位別の中性化比率

	南面／北面	東面／北面	西面／北面	西面／東面
中性化速度係数 (mm/√年)	5.53／3.31	3.91／3.31	4.25／3.31	4.25／3.91
中性化比率	1.67	1.18	1.28	1.09

#### (2) 屋外と床下の中性化傾向

屋外と床下の環境の違いによる中性化への影響は明瞭に表われており、前述の表 4.3.1-1 に示すように、近畿の東面における屋外と床下の中性化速度係数  $A_N$  がほぼ同じであることを除けば、残りは全ての地域・方位において、屋外に比べて床下の中性化速度係数  $A_N$  の方が小さい。全方位・全地域で見ると、中性化速度係数  $A_N$  における床下／屋外の比率は 0.69 (=2.89/4.16) 倍、データ数が十分にある西面・全地域で見ると、床下／屋外西面の中性化比率は 0.71 (=3.00/4.25) 倍、東面・全地域では、床下／屋外東面の中性化比率は 0.79 (=3.08/3.91) 倍である。また、中性化速度係数  $A_N$  の各回帰式における決定係数  $R^2$  値は、床下の方が高かった。床下は、雨がかりや

日射の影響がなく、温湿度も屋外に比べて安定しているため、建築物によって環境条件の差異が少ないためと考えられる。

ここでは、使用材料や施工品質などの差異による影響をなるべく排除し、屋外と床下の環境条件の違いによる影響をより明確にするために、貫通コアの両側面の中性化データのみを抽出し、同一コアでの屋外側と床下側の中性化速度係数  $A_N$  を用いて求めた中性化比率（＝床下の中性化速度係数  $A_N$  / 屋外の中性化速度係数  $A_N$ ）に基づいて検討を行う。貫通コアは全部で 673 本あり、方位別では、西面が 363 本、東面が 119 本、北面が 19 本、南面が 3 本、方位不明が 169 本である。データ数が多い西面および東面について、屋外と床下の中性化速度係数  $A_N$  の関係を図 4.3.2-1 および図 4.3.2-2 に示す。また、屋外に対する床下の中性化速度係数  $A_N$  の比率の度数分布について、西面を表 4.3.2-2 および図 4.3.2-3 に、東面を表 4.3.2-3 および図 4.3.2-4 に示す。

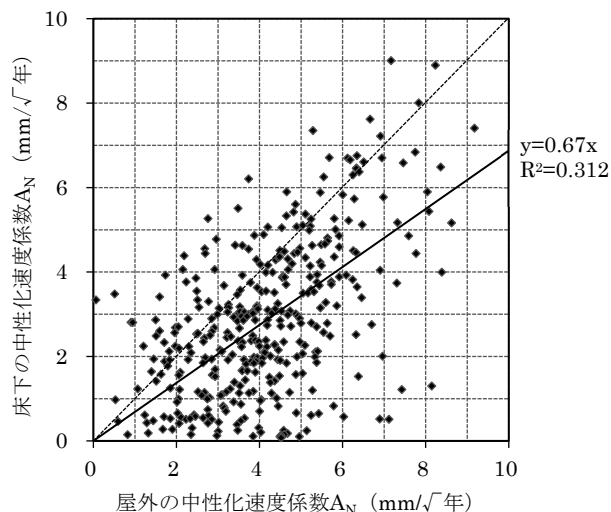


図 4.3.2-1 屋外西面と床下の中性化速度係数  $A_N$  の関係

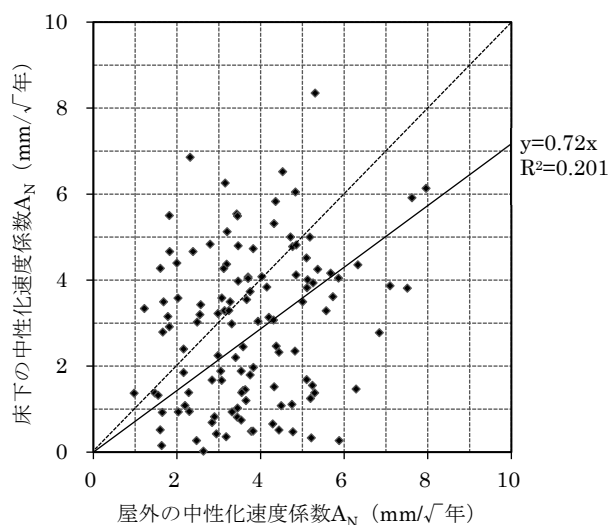


図 4.3.2-2 屋外東面と床下の中性化速度係数  $A_N$  の関係

表 4.3.2-2 床下／屋外西面の中性化比率と度数分布

中性化比率	0～	0.1～	0.2～	0.3～	0.4～	0.5～	0.6～	0.7～	0.8～	0.9～	1.0～	1.1～	1.2～	1.3～	1.4～	1.5～	1.6～	1.7～	1.8～	1.9～	2.0～	計
本数	18	19	23	27	29	32	32	34	35	32	28	15	8	9	1	2	7	0	3	2	7	363
比率(%)	5.0	5.2	6.3	7.4	8.0	8.8	8.8	9.4	9.6	8.8	7.7	4.1	2.2	2.5	0.3	0.6	1.9	0.0	0.8	0.6	1.9	100
累加(%)	5.0	10.2	16.5	24.0	32.0	40.8	49.6	59.0	68.6	77.4	85.1	89.3	91.5	93.9	94.2	94.8	96.7	96.7	97.5	98.1	100	100

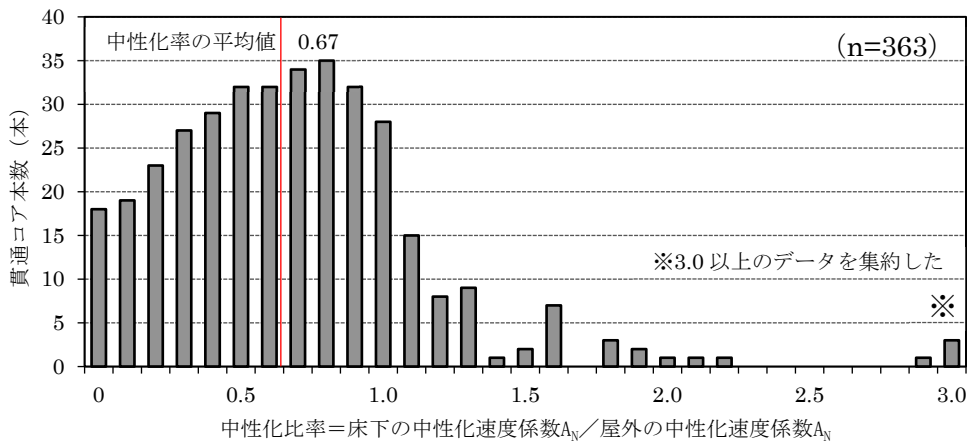


図 4.3.2-3 床下／屋外西面の中性化比率と度数分布

表 4.3.2-3 床下／屋外東面の中性化比率と度数分布

中性化比率	0～	0.1～	0.2～	0.3～	0.4～	0.5～	0.6～	0.7～	0.8～	0.9～	1.0～	1.1～	1.2～	1.3～	1.4～	1.5～	1.6～	1.7～	1.8～	1.9～	2.0～	計
本数	5	7	12	5	8	10	8	11	4	7	8	4	5	5	2	2	4	3	0	2	7	119
比率(%)	4.2	5.9	10.1	4.2	6.7	8.4	6.7	9.2	3.4	5.9	6.7	3.4	4.2	4.2	1.7	1.7	3.4	2.5	0.0	1.7	5.9	100
累加(%)	4.2	10.1	20.2	24.4	31.1	39.5	46.2	55.5	58.8	64.7	71.4	74.8	79.0	83.2	84.9	86.6	89.9	92.4	92.4	94.1	100	100

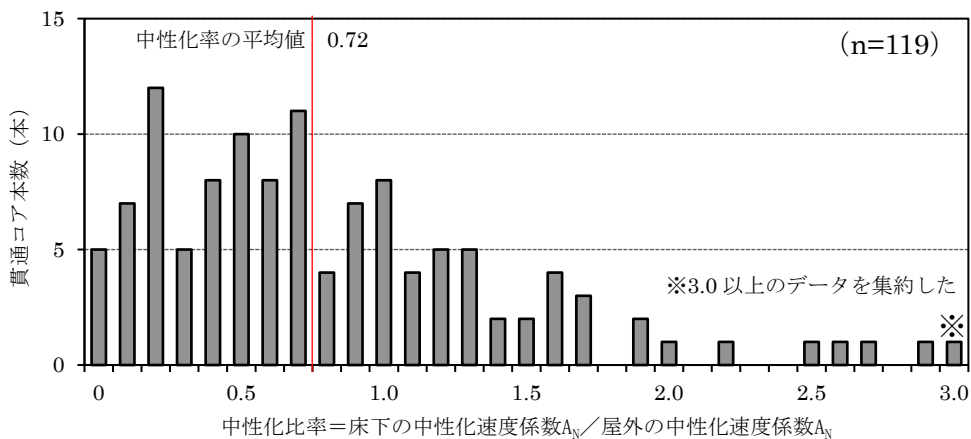


図 4.3.2-4 床下／屋外東面の中性化比率と度数分布



中性化比率の値は広い範囲でのばらつきは見られるが、床下の中性化速度係数  $A_N$  が屋外の中性化速度係数  $A_N$  を下回っているコア本数の割合は西面で 80%程度、東面で 70%程度になり、床下／屋外の中性化比率の平均は、表 4.3.2-4 に示すように西面で 0.67 倍、東面で 0.72 倍程度である。前述の表 4.3.1-1 に示すように床下側および屋外側の中性化データを別々に集計し、それぞれ最小二乗法で計算した中性化速度係数  $A_N$  から求めた中性化比率は、西面で 0.71 倍(=3.00/4.25)、東面で 0.79 倍(=3.08/3.91) で、貫通コアにおける床下側と屋外側の中性化データを直接比較した場合の値と近い傾向を示していた。すなわち、本研究で扱っているコンクリートとその中性化データにおいては、同一のコンクリートに基づいていなくても、その材料の違いが中性化速度に及ぼす影響は統計分析上はないものと見なすことが可能であると考えられ、温度や湿度の影響に関する比較検討が概ね可能であることを裏付けている。これは採取したコアのコンクリートが、いずれもほぼ同一の設計基準強度で、共通の工事仕様書に基づいて施工されていたものであり、品質にもおおきな大きなばらつきはないためと思われる。

表 4.3.2-4 基礎立上りの床下と屋外の中性化比率

	床下／屋外西面	床下／屋外東面
中性化比率	0.67	0.72

### (3) 温湿度による影響係数を用いた中性化比率に対する評価

(2) で床下側の中性化の進行が抑制されている要因として、床下は直接の雨がかりにはならないが、外気に比べて湿度が高いことが想定されることから、このコンクリート表面における湿度の差が特に中性化の進行に影響を与えていると考えられる。

ここでは、温度・相対湿度による中性化速度への影響について、データ数が多い西面を対象にして検討する。

前述の表 4.2.4-1 の建築物における、2016 年 2 月 3 日から 2017 年 1 月 27 日までの計測記録から求めた基礎立上りの床下側および屋外西面における日平均温度および日平均相対湿度の月別の平均値および全体の平均値を表 4.3.2-5 に示す。また、日平均温度の推移についての比較を図 4.3.2-5 に、日平均湿度の推移についての比較を図 4.3.2-6 に示す。

表 4.3.2-5 基礎立上りの床下および屋外西面の日平均温度および日平均相対湿度の月別平均値

測定項目	部位	位置	月別の平均値 (2016年2月～2017年1月)												全体平均
			2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	
温度 (°C)	基礎立上り部	床下	9.3	10.8	15.0	19.2	21.3	23.8	26.2	24.5	20.1	13.8	10.7	7.9	17.0
		屋外	9.5	11.8	16.5	20.9	23.0	26.1	28.5	25.6	20.4	13.5	10.4	7.5	17.9
相対湿度 (%)	基礎立上り部	床下	78.1	77.9	78.8	79.8	85.1	89.2	85.1	88.4	85.0	83.4	78.5	73.7	82.0
		屋外	64.5	65.6	67.2	68.3	74.5	77.6	72.2	82.5	77.3	78.9	71.7	65.5	72.3

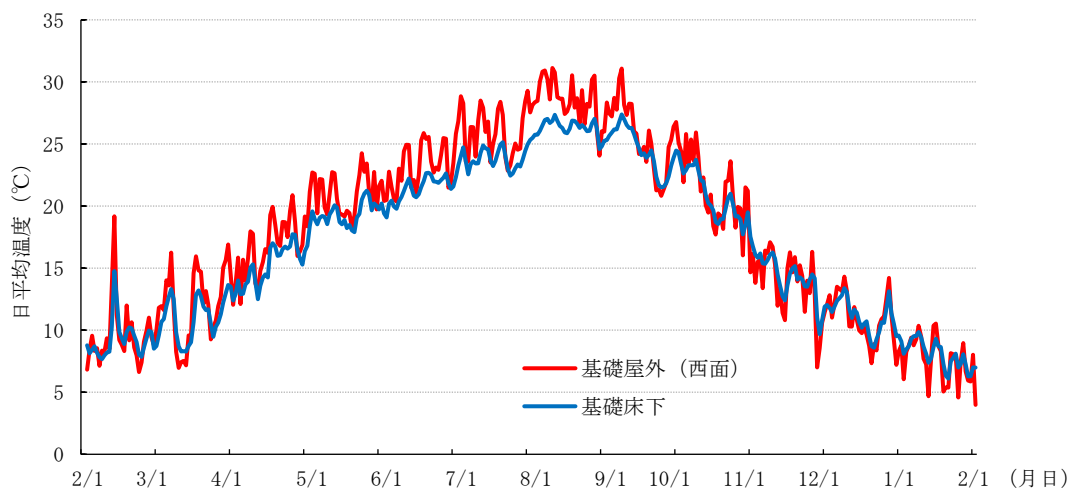


図 4.3.2-5 基礎立上りの床下および屋外西面における日平均温度の推移

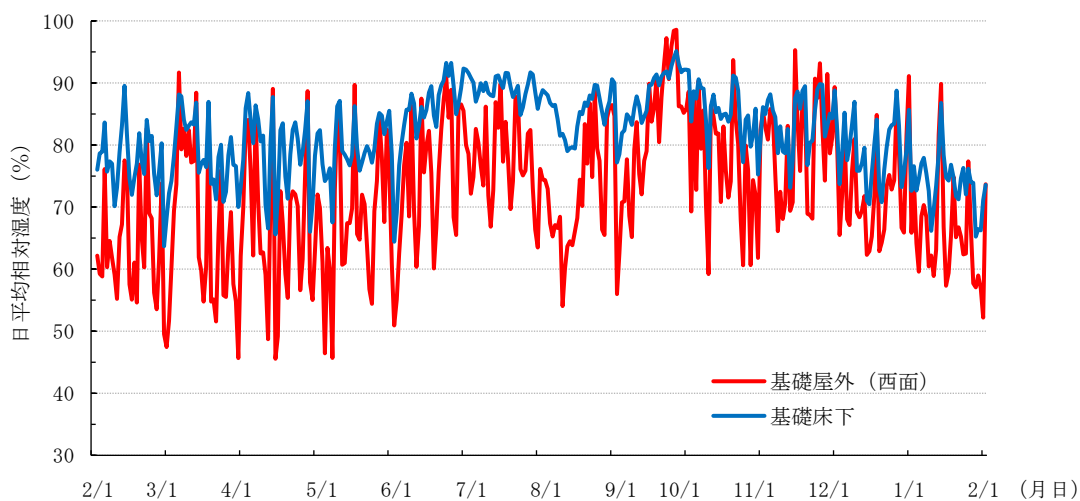


図 4.3.2-6 基礎立上りの床下および屋外西面における日平均相対湿度の推移

基礎立上りにおける日平均温度の平均値は、床下で 17.0℃、屋外西面で 17.9℃で、床下の方が若干低く、その差は 0.9℃であった。季節ごとに見れば、特に夏期において床下は屋外との温度差が大きくなる。基礎立上りにおける日平均相対湿度の平均値は床下で 82.0%、屋外で 72.3%で、床下の方が高く、その差は 9.7%であった。床下は直接の雨がかりにはならないが、季節に関わらず高湿度の環境が維持され、乾燥する冬期でも 70%以上である。

次に屋外と床下の温度差および相対湿度差によって、実環境における実建築物の中性化進行にどの程度の影響を与えているかの推定を行うために、基礎立上り側面の屋外西面と床下側の日平均温度および日平均相対湿度を前述の式(4.2.5-4)および式(4.2.5-5)に代入して求めた影響係数の比率と、図 4.3.2-1 に示すような実測した中性化深さ  $d_N$  から求めた床下/屋外の中性化速度係数  $A_N$  による中性化比率を比較する。

式(4.2.5-4)による温度の影響係数  $\beta_1$  および式(4.2.5-5)による相対湿度の影響係数  $\beta_2$  における床下/屋外の各比率および  $\beta_1$  と  $\beta_2$  を掛け合わせた ( $\beta_1 \times \beta_2$ ) 結果における床下/屋外の比率を図 4.3.2-7 に示す。ここでは、日平均温度および日平均相対湿度から求めた各数値を月平均で示した。

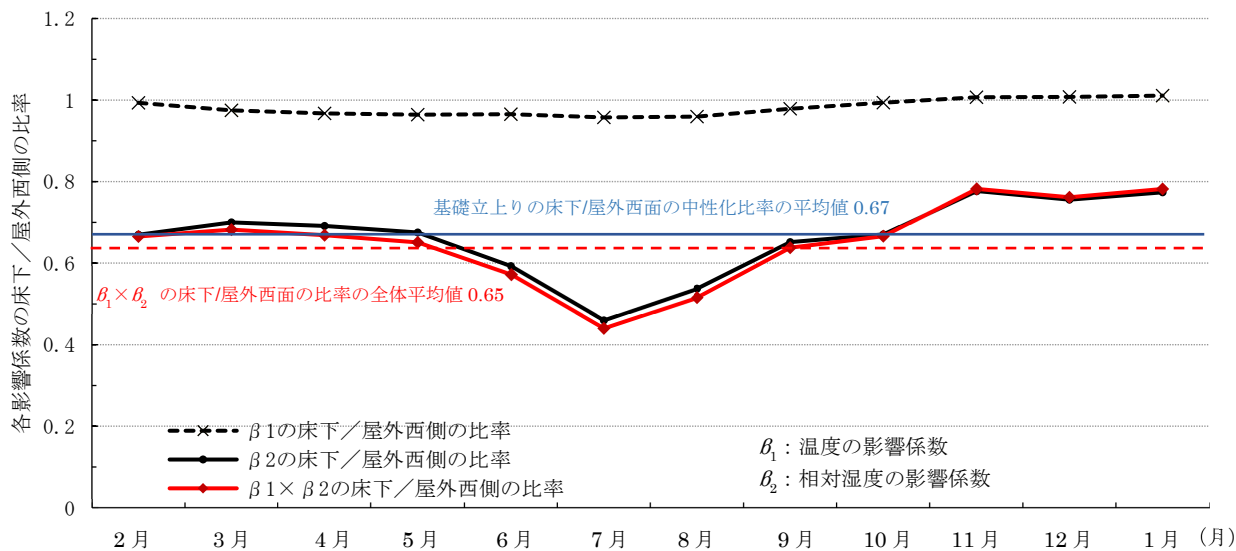


図 4.3.2-7 計測した温度・相対湿度に基づく中性化への影響係数の床下/屋外西面の比率

温度や相対湿度の変化を月平均で捉えた場合に、 $b_1$ の床下／屋外西面の影響係数比率は 0.96～1.01 で平均値は 0.98、 $b_2$ の床下／屋外の影響係数比率は 0.46～0.78 で平均値は 0.66、 $b_1 \times b_2$ の床下／屋外の影響係数比率は 0.44～0.78 で平均値は 0.65 であった。 $b_1 \times b_2$ の床下／屋外の影響係数比率の推移は、ほぼ  $b_2$ の比率によるものであり、中性化深さの差異に対する要因として、温度差より相対湿度差の影響の方が大きいことが分かる。一方、図 4.3.2-1 に示すように基礎立上りの床下／屋外西面における中性化比率の平均値は 0.67 で、温度と相対湿度による影響係数  $b_1 \times b_2$ の床下／屋外の比率の平均値 0.65 と比較すると、中性化深さの実測値による中性化比率と、実測した温湿度による影響係数の比率はほぼ同じ結果が得られている。

促進中性化試験で用いられている温度・相対湿度の影響係数の式に実建築物で実測した各環境条件における温度・相対湿度を適用し、温度・相対湿度の差異が中性化速度に与える影響を比率として表した値と、実建築物調査で求めた環境条件別の中性化速度係数の比率の値は概ね一致しており、これらの式を適用することの妥当性を確認できた。

#### 4.4 まとめ

本章では、関東・近畿・東海の温暖な気候地域における平野部都市圏に建設された集合住宅を対象に、基礎立上りにおける打放しコンクリート部分の中性化の実態について、採取したコアコンクリートの調査により総括的に傾向の把握を行った。採取データを方位別、部位別（屋外側・床下側）に分類し、中性化速度係数を算出した。屋外側と床下側の環境条件の相違を躯体表層近傍で実測した温度・相対湿度により指標化し、中性化進行の差異と関連づけて考察した。

結論を以下に示す。

- (1) 実環境における築後 15 年以上経過した実建築物から採取したコア 1210 本について、方位別および部位別（屋外側・床下側）に分類して中性化速度係数を算出し、その違いが及ぼす影響を定量的に把握した。また、これらの中性化速度係数と圧縮強度の関係式を示した。
- (2) 床下は、屋外と比べると、中性化速度係数は 0.7 倍程度に抑制されている。また、中性化速度係数の回帰式における決定係数は、床下の方が高かった。床下は、雨がかりや日射の影響がなく、温湿度も屋外に比べて安定しているため、建築物によって環境条件の差異が少ないためと考えられる。
- (3) 屋外の中性化速度係数は、方位別では、南面>西面>東面>北面の順で大きく、その比率は南面が北面の 1.67 倍程度である。一方、床下は日射がないため、方位による影響は表れにくい。
- (4) 基礎立上りの床下側と基礎立上りの屋外側西面における日平均温度および日平均相対湿度の比較では、平均値にして、床下側の方が温度は 1.3℃低く、相対湿度は 10.8%高かった。
- (5) 実測した温度・相対湿度を、促進中性化試験で用いられている中性化進行の影響係数の式に適用した結果、床下と屋外西面の比率は平均で 0.65 であり、実測した中性化深さによる中性化比率 0.67 と概ね一致した。実建築物において、環境条件が局所的に異なる部位間における中性化進行の差異について、温度および相対湿度を指標にして評価することにより、その傾向を定量的に把握することが可能であることを示した。

## 参考文献

- 4-1) 阿部道彦ほか 5 名：コンクリートの促進中性化試験法の評価に関する研究，日本建築学会構造系論文報告集，第 409 号，pp.1-10，1990.3
- 4-2) 橋本佳大ほか 1 名：地表面の跳ね返り雨水による外壁面足下部の濡れに関する実験的研究，日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1，pp.279-280，2002.8
- 4-3) 畑中稔臣ほか 4 名：戸建住宅の床下温湿度性状に関する研究，平成 10 年度日本建築学会近畿支部研究報告集，pp.237-240，1998.5
- 4-4) 岩前篤ほか 3 名：戸建て住宅の床下温湿度性状に関する研究（その 2），平成 11 年度日本建築学会近畿支部研究報告集，pp.93-96，1999.5
- 4-5) 和泉意登志ほか 1 名：経年建築物におけるコンクリートの中性化と鉄筋の腐食，日本建築学会構造系論文報告集，第 406 号，pp.1-12，1989.12
- 4-6) 鶴木圭一ほか 1 名：局所的な内部温・湿度状態がコンクリート造建築物に及ぼす影響に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，vol.31，No.1，pp.967-972，2009
- 4-7) 木野瀬透ほか 6 名：築 49 年を経過した既存鉄筋コンクリート造建築物の材料調査，その 3，日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1，pp.1125-1126，2014.9
- 4-8) 国立天文台：理科年表平成 28 年，2015
- 4-9) 和泉意登志：コンクリートの中性化に及ぼすセメントの種類，調合および養生条件の影響について，第 7 回コンクリート工学年次講演会論文集，pp.117-120，1985
- 4-10) 馬場明生ほか 3 名：グラウトしたコンクリートメーソソリーの中性化，日本建築学会構造系論文報告集，第 498 号，pp.1-6，1997.8
- 4-11) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計施工指針・同解説，2016
- 4-12) 長谷川拓哉ほか 1 名：文献調査に基づく屋外の中性化進行予測，コンクリート工学年次論文集，vol.28，No.1，pp.665-670，2006
- 4-13) 春畑仁一ほか 2 名：既存鉄筋コンクリート造建築物のコンクリート材料調査における圧縮強度と中性化深さの統計，その 1，その 2，日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1，pp.549-552，2011.8

## 第5章 実建築物の中性化進行の予測における促進中性化試験の適用手法

### 5.1 はじめに

本章では、促進中性化試験の結果から実環境下における実建築物の中性化の進行を予測するために必要となるデータの整理・分析と予測手法の提案を行うことを目的とした。一定の試験室環境（CO<sub>2</sub>濃度：5%，温度：20℃，相対湿度：60%）におけるコンクリート供試体の中性化に対して、実環境・実建築物であることがコンクリートの中性化に及ぼす影響，すなわち CO<sub>2</sub>濃度，温度，湿度などの実際の環境条件やコンクリートの打込み，養生，締固めなどの実際の施工条件による影響を中性化速度係数などの比率を指標として包括的に把握するものである。

研究内容としては、まず、促進中性化試験に関して、これまでは限定された個々の研究成果の報告に留まっていることから、本研究において既往の促進中性化試験のデータを収集・整理し、総括的な傾向を検討した。次に、第4章の成果である実環境における実建築物のコンクリートの圧縮強度と中性化速度係数の関係式を用いて、促進中性化試験による中性化と実環境における実建築物の中性化の対応に関する検討を行った。すなわち、これは促進中性化試験における中性化の進行が実環境での長期にわたる中性化の進行の何倍の状態に相当するかに関して検討したもので、実環境におけるコンクリートの中性化の進行を促進中性化試験の結果から予測する上での目安となる数値を提示した。

### 5.2 促進中性化試験データの分析

#### 5.2.1 データ収集および分析方法

データ収集の対象は、1993～2013年の過去20年間に日本建築学会構造系論文集、日本建築学会大会梗概集、コンクリート工学年次大会論文集等で発表された研究報告とした。この中から、文献<sup>5-1)</sup>に示された試験方法もしくはJIS A 1153に準拠して行われた促進中性化試験による中性化深さ（以下、促進中性化深さと呼ぶ。）のデータが示された文献15編<sup>5-2)~5-16)</sup>を取り上げ、計68のデータを収集した。収集したデータはいずれも普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートで水セメント比W/Cは0.40～0.80、使用混和剤はAE減水剤または高性能AE減水剤である。その中でも、W/Cについては0.50～0.65が多く56データを占めた。また、材齢28日圧縮強度 $\sigma_{c28}$ については21.7～71.1N/mm<sup>2</sup>の範囲のデータが収集できたが、25～45N/mm<sup>2</sup>の範囲のものが多かった。表5.2.1-1に引用した促進中性化試験データの範囲と試験条件を、表5.2.1-2～5.2.1-

4 に引用した促進中性化試験データを示す。これらのデータに基づいて、促進中性化試験による中性化速度係数（以下、促進中性化速度係数と呼ぶ。）について W/C および圧縮強度との関係を中心に整理し、その傾向を把握する。

表 5. 2. 1-1 引用した促進中性化試験データの範囲

項目	水準
セメントの種類	普通ポルトランドセメント
水セメント比 W/C	0.40~0.80
スランプ (cm)	2.5~20.5
空気量 (%)	3.7~6.0
使用混和剤	AE 減水剤, 高性能 AE 減水剤
20°C水中養生期間 (週)	4
促進中性化期間 (週)	1~26
温度 (°C)	20±2
相対湿度 (%)	60±5
二酸化炭素濃度 (%)	5±0.2
収集したデータ数	68 (文献 15 編)
材齢 28 日圧縮強度のあるデータ数	56



表 5.2.1-2 引用した促進中性化試験データ (1/3)

番号	W/C	単位量 [kg/m <sup>3</sup> ]		混和剤 *1	フレッシュ試験		圧縮強度 N/mm <sup>2</sup> *2				促進中性化深さ (mm) *3								促進中性化 速度係数*4 (mm/√週)	引用 文献 *5		
					SL 値	Air	材 齢 (日)				材 齢 (週)											
		(cm)	(%)		28	56	91	182	1	2	4	5	8	9	13	16	25	26				
1	0.40	138	345	S	2.5	4.6	—	—	—	—	—	—	1.1	—	0.5	—	3.0	—	—	3.2	0.61	5-6)
2	0.40	165	412	S	17.0	4.7	55.7	63.0	—	—	0.0	—	0.0	—	—	0.0	—	0.0	0.0	—	0.00	5-7)
3	0.40	138	345	S	2.5	4.6	71.1	—	—	—	—	—	1.4	—	0.7	—	2.9	—	—	3.5	0.68	5-8)
4	0.40	170	425	S	18.2	5.5	61.6	—	69.9	—	0.0	—	0.6	—	1.5	—	2.3	—	—	5.2	0.77	5-9)
5	0.40	170	425	S	16.4	5.5	55.5	—	65.6	—	0.3	—	0.7	—	2.7	—	3.2	—	—	5.6	0.95	5-9)
6	0.43	178	414	A	17.5	4.6	49.2	54.8	56.6	58.1	—	—	0.6	—	1.2	—	1.5	—	—	1.9	0.39	5-16)
7	0.45	145	322	S	3.0	4.7	53.2	—	—	—	—	—	2.9	—	3.5	—	6.1	—	—	7.1	1.48	5-8)
8	0.46	205	450	S	—	—	—	—	—	—	—	—	0.0	—	2.5	—	1.9	—	—	—	0.56	5-14)
9	0.50	160	320	A	5.0	4.2	—	—	—	—	—	—	5.6	—	6.3	—	7.7	—	—	10.1	2.13	5-6)
10	0.50	168	336	A	12.5	5.0	42.7	52.9	—	—	0.0	—	2.1	—	—	5.8	—	7.6	7.5	—	1.58	5-7)
11	0.50	180	360	S	—	—	43.5	—	—	—	4.4	—	7.7	—	9.5	—	10.1	—	—	13.8	2.95	5-2)
12	0.50	180	360	S	—	—	43.5	—	—	—	4.5	—	6.0	—	7.8	—	8.8	—	—	12.2	2.55	5-2)
13	0.50	180	360	S	—	—	43.5	—	—	—	6.1	—	8.3	—	10.4	—	12.7	—	—	16.7	3.52	5-2)
14	0.50	180	360	S	—	—	43.5	—	—	—	4.2	—	7.2	—	8.4	—	10.7	—	—	13.2	2.85	5-2)
15	0.50	160	320	A	5.0	4.2	42.1	—	—	—	—	—	5.7	—	6.1	—	8.1	—	—	10.2	2.09	5-8)
16	0.50	178	356	A	20.0	4.6	—	—	—	—	4.3	—	6.1	—	8.6	—	9.0	—	—	—	2.83	5-10)
17	0.50	161	322	A	—	—	—	—	—	—	—	0.0	—	6.0	—	7.6	—	—	—	—	2.27	5-12)
18	0.50	161	322	A	—	—	—	—	—	—	—	0.0	—	3.8	—	5.4	—	—	—	—	1.54	5-12)
19	0.50	185	370	A	—	—	45.4	—	—	—	2.8	3.2	4.7	—	5.2	—	—	—	—	—	2.02	5-13)
20	0.50	175	350	A	—	—	42.7	—	—	—	3.0	3.9	5.7	—	6.0	—	—	—	—	—	2.39	5-13)
21	0.50	165	330	A	—	—	39.7	—	—	—	2.3	3.5	5.2	—	6.3	—	—	—	—	—	2.40	5-13)
22	0.50	174	348	A	18.5	4.9	41.8	47.1	48.9	49.8	—	—	4.2	—	5.0	—	6.5	—	—	8.2	1.73	5-16)
23	0.55	182	331	A	19.9	4.1	42.9	—	47.9	—	—	—	—	—	7.7	—	10.4	—	—	—	2.59	5-5)
24	0.55	182	331	A	19.9	4.1	42.9	—	47.9	—	—	—	—	—	7.7	—	—	12.0	—	—	2.44	5-5)
25	0.55	182	331	A	20.5	4.2	40.4	—	45.3	—	—	—	—	—	8.1	—	10.7	—	—	—	2.68	5-5)

\*1 混和剤の記号は、次のとおりである。S：高性能 AE 減水剤，A：AE 減水剤， \*2 圧縮強度は、引用文献で数値が明記されていない場合はグラフから数値を読み取った。未計測は「—」とした。、 \*3 促進中性化深さは、引用文献で数値が明記されていない場合はグラフから読み取った。未計測は「—」とした。、 \*4 促進中性化速度係数は、引用文献で数値が明記されていない場合は、表中の「促進中性化深さ」の数値から最小二乗法による回帰式で求めた。、 \*5 引用文献の番号は、章末に示す参考文献番号に対応している。

表 5.2.1-3 引用した促進中性化試験データ (2/3)

番号	W/C	単位量 [kg/m <sup>3</sup> ]		混 和 剤 *1	フレッシュ試験		圧縮強度 N/mm <sup>2</sup> *2				促進中性化深さ (mm) *3								促進中性化 速度係数*4 (mm/√週)	引用 文献 *5		
		W	C		SL値	Air	材 齢 (日)				材 齢 (週)											
					(cm)	(%)	28	56	91	182	1	2	4	5	8	9	13	16			25	26
26	0.55	182	331	A	20.5	4.2	40.4	—	45.3	—	—	—	—	—	8.1	—	—	13.0	—	2.63	5-5)	
27	0.55	181	329	A	18.7	3.7	42.6	—	—	—	—	—	8.3	—	10.6	—	12.7	—	—	16.5	3.46	5-3)
28	0.55	170	309	S	17.6	5.2	42.0	—	49.2	—	3.9	—	7.6	—	9.3	—	12.5	—	—	16.7	3.38	5-9)
29	0.55	170	309	S	18.2	5.8	39.7	—	47.5	—	4.9	—	8.1	—	9.8	—	12.2	—	—	15.0	3.25	5-9)
30	0.55	170	309	S	18.0	5.0	38.8	—	47.2	—	4.2	—	8.2	—	9.9	—	11.9	—	—	14.6	3.20	5-9)
31	0.55	170	309	S	18.5	4.4	37.7	—	44.9	—	4.7	—	7.5	—	9.1	—	11.9	—	—	13.9	3.06	5-9)
32	0.55	170	309	S	16.6	4.9	40.9	—	50.1	—	3.8	—	7.5	—	9.1	—	10.8	—	—	13.5	2.93	5-9)
33	0.55	170	309	S	18.6	5.9	41.4	—	50.4	—	4.7	—	7.6	—	10.4	—	12.8	—	—	17.8	3.58	5-9)
34	0.55	170	309	S	19.3	6.0	38.8	—	47.5	—	4.5	—	8.7	—	9.8	—	11.2	—	—	14.7	3.17	5-9)
35	0.55	180	327	A	19.5	4.9	30.5	—	37.3	—	5.9	—	10.8	—	11.8	—	16.1	—	—	18.5	4.11	5-15)
36	0.55	180	327	A	18.5	4.7	30.6	—	35.4	—	4.5	—	8.2	—	11.0	—	14.2	—	—	16.2	3.58	5-15)
37	0.56	185	330	A	—	—	40.9	—	—	—	3.8	4.3	6.0	—	7.7	—	—	—	—	—	2.83	5-13)
38	0.56	175	313	A	—	—	36.9	—	—	—	3.8	4.9	6.6	—	8.3	—	—	—	—	—	3.08	5-13)
39	0.56	165	295	A	—	—	35.5	—	—	—	4.1	4.8	5.7	—	8.6	—	—	—	—	—	3.19	5-13)
40	0.57	205	360	S	—	—	—	—	—	—	—	—	7.4	—	10.0	—	10.9	—	—	—	3.25	5-14)
41	0.60	164	273	A	5.5	5.0	—	—	—	—	—	—	8.6	—	10.7	—	13.6	—	—	18.4	3.73	5-6)
42	0.60	168	280	A	13.0	4.5	33.9	41.3	—	—	4.7	—	8.5	—	—	12.8	—	15.3	18.4	—	3.72	5-7)
43	0.60	180	300	S	—	—	33.8	—	—	—	6.7	—	11.5	—	14.8	—	17.4	—	—	24.5	4.99	5-2)
44	0.60	180	300	S	—	—	33.8	—	—	—	6.4	—	9.9	—	14.1	—	16.1	—	—	23.1	4.65	5-2)
45	0.60	180	300	S	—	—	33.8	—	—	—	7.9	—	13.2	—	16.6	—	22.0	—	—	29.2	5.95	5-2)
46	0.60	180	300	S	—	—	33.8	—	—	—	6.3	—	10.0	—	14.0	—	16.5	—	—	22.5	4.62	5-2)
47	0.60	164	273	A	5.5	5.0	27.9	—	—	—	—	—	8.3	—	10.2	—	13.5	—	—	18.0	3.64	5-8)
48	0.60	180	300	A	18.5	4.7	—	—	—	—	4.5	—	10.9	—	16.1	—	16.4	—	—	—	4.96	5-10)
49	0.60	173	288	A	—	—	—	—	—	—	—	—	10.5	—	12.8	—	15.0	—	—	20.7	4.25	5-11)
50	0.60	157	262	A	—	—	—	—	—	—	—	—	8.7	—	10.2	—	13.3	—	—	16.2	3.47	5-11)

\*1 混和剤の記号は、次のとおりである。S：高性能 AE 減水剤，A：AE 減水剤， \*2 圧縮強度は、引用文献で数値が明記されていない場合はグラフから数値を読み取った。未計測は「—」とした。、 \*3 促進中性化深さは、引用文献で数値が明記されていない場合はグラフから読み取った。未計測は「—」とした。、 \*4 促進中性化速度係数は、引用文献で数値が明記されていない場合は、表中の「促進中性化深さ」の数値から最小二乗法による回帰式で求めた。、 \*5 引用文献の番号は、章末に示す参考文献番号に対応している。

表 5.2.1-4 引用した促進中性化試験データ (3/3)

番号	W/C	単位量 [kg/m <sup>3</sup> ]		混 和 剤 *1	フレッシュ試験		圧縮強度 N/mm <sup>2</sup> *2				促進中性化深さ (mm) *3								促進中性化 速度係数*4 (mm/√週)	引用 文献 *5		
					SL 値	Air	材 齢 (日)				材 齢 (週)											
		(cm)	(%)		28	56	91	182	1	2	4	5	8	9	13	16	25	26				
51	0.60	182	283	A	17.5	5.0	30.5	35.6	38.4	38.5	(当該試験については、中性化速度係数のみ明記がある)								3.50	5-16)		
52	0.65	182	280	A	20.5	4.3	29.4	—	34.9	—	—	—	—	—	—	12.9	—	—	20.5	—	4.15	5-5)
53	0.65	181	280	A	20.2	4.3	29.3	—	34.9	—	—	—	—	—	14.0	—	—	22.2	—	4.50	5-5)	
54	0.65	183	278	A	18.7	3.8	33.5	—	—	—	—	—	12.4	—	16.2	—	19.9	—	—	26.7	5.46	5-3)
55	0.65	183	282	A	19.0	4.3	30.8	35.3	36.8	—	—	—	11.7	—	—	16.4	—	21.7	28.4	—	5.15	5-4)
56	0.65	183	282	A	18.4	4.2	31.9	37.4	39.1	—	—	—	10.0	—	—	15.4	—	19.5	24.1	—	4.63	5-4)
57	0.65	183	282	A	18.1	4.3	31.5	37.4	39.0	—	—	—	12.2	—	—	16.9	—	22.5	27.2	—	5.12	5-4)
58	0.65	183	282	A	20.0	3.7	31.1	34.1	36.2	—	—	—	11.7	—	—	16.3	—	21.3	27.4	—	5.02	5-4)
59	0.65	183	282	A	19.5	4.0	33.6	35.9	38.7	—	—	—	11.7	—	—	16.6	—	21.4	26.4	—	4.95	5-4)
60	0.65	183	282	A	19.0	4.1	30.4	35.7	36.4	—	—	—	11.0	—	—	16.1	—	20.8	25.7	—	4.81	5-4)
61	0.65	183	282	A	19.5	4.1	32.0	36.1	36.9	—	—	—	11.0	—	—	16.5	—	22.5	27.0	—	5.08	5-4)
62	0.66	185	285	A	—	—	30.2	—	—	—	5.5	7.1	8.9	—	11.2	—	—	—	—	—	4.21	5-13)
63	0.65	175	269	A	—	—	28.0	—	—	—	5.4	7.6	10.5	—	14.2	—	—	—	—	—	5.14	5-13)
64	0.65	165	254	A	—	—	24.8	—	—	—	6.1	8.6	11.4	—	15.3	—	—	—	—	—	5.66	5-13)
65	0.70	172	246	A	11.0	4.2	29.1	33.1	—	—	5.3	—	10.4	—	—	16.1	—	18.5	23.0	—	4.72	5-7)
66	0.70	178	254	A	15.5	4.9	—	—	—	—	8.9	—	13.2	—	18.4	—	22.1	—	—	—	6.31	5-10)
67	0.75	175	233	A	17.5	4.0	21.7	25.6	27.2	27.8	(当該試験については、中性化速度係数のみ明記がある)								5.75	5-16)		
68	0.80	175	219	A	8.0	4.5	25.0	29.8	—	—	6.1	—	11.8	—	—	16.0	—	19.6	23.6	—	5.07	5-7)

\*1 混和剤の記号は、次のとおりである。S：高性能 AE 減水剤，A：AE 減水剤， \*2 圧縮強度は、引用文献で数値が明記されていない場合はグラフから数値を読み取った。未計測は「—」とした。、 \*3 促進中性化深さは、引用文献で数値が明記されていない場合はグラフから読み取った。未計測は「—」とした。、 \*4 促進中性化速度係数は、引用文献で数値が明記されていない場合は、表中の「促進中性化深さ」の数値から最小二乗法による回帰式で求めた。、 \*5 引用文献の番号は、章末に示す参考文献番号に対応している。

## 5.2.2 分析結果および考察

### (1) 水セメント比と促進中性化速度係数の関係

一般に、促進中性化深さ  $d_A$  (mm) は、促進期間  $t_A$  (週) の平方根に比例する ( $\sqrt{t}$  則) とされており、次式で表される。

$$d_A = A_A \sqrt{t_A} \quad (5.2.2-1)$$

ここで、 $A_A$  : 促進中性化速度係数 (mm/ $\sqrt{\text{週}}$ )、とする。

図 5.2.2-1 に、表 5.2.1-2~4 のデータの W/C と促進中性化速度係数  $A_A$  の関係を示す。また、表 5.2.2-1 に、同一 W/C でデータ数が 5 以上あるものについて、促進中性化速度係数  $A_A$  の平均値、標準偏差などを示す。W/C と促進中性化速度係数  $A_A$  の関係については、直線とする提案<sup>5-17)</sup> や指数関数とする提案<sup>5-18)</sup> ( $A_A = me^{n \cdot W/C}$ 、ここで、 $e$  は自然対数の底、 $m, n$  は定数とする。) などがある。本分析データにおいては、ほぼ直線的な関係を示しており、実験値を用いた最小二乗法により求めた回帰式の式 (5.2.2-2) で表すことができる。一方、指数関数による回帰式も図 5.2.2-1 に破線で示す。指数関数の式は W/C が小さくなるに従って  $A_A$  の勾配も小さくなるという試験結果<sup>5-18)</sup>に基づき提案されているが、そこでの試験条件と本論文で収集を行ったデータにおける試験条件を比較すると、養生期間が 9 週、促進試験温度が 30°C である点に相違がある。この指数関数の式を本データに適用すると、W/C が 0.50 より小さい範囲で、曲線の勾配が緩くなっていくことに伴い、次第に実験値と乖離が生じていく傾向を示している。

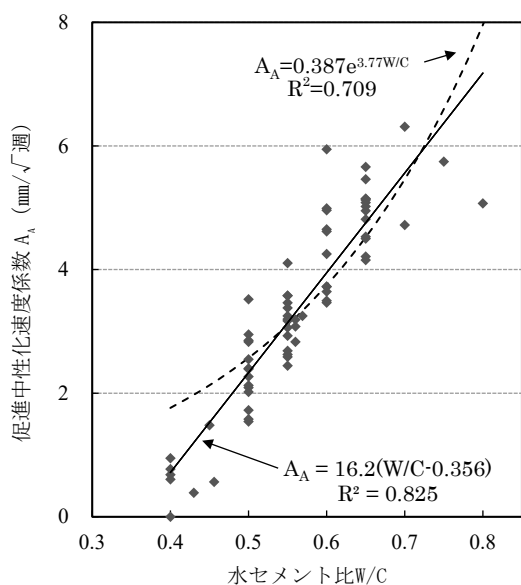


表 5.2.2-1 W/C ごとの促進中性化速度係数の実験値

W/C	0.40	0.50	0.55	0.60	0.65
データ数	5	14	14	11	13
文献数	4	8	4	7	4
最小値	0.00	1.54	2.15	3.47	4.15
最大値	0.68	3.52	4.11	5.95	5.66
平均値	0.38	2.35	3.05	4.31	4.91
標準偏差	0.24	0.54	0.51	0.75	0.43
変動係数	0.65	0.23	0.17	0.17	0.09

(中性化速度係数の単位はmm/ $\sqrt{\text{週}}$ で、データ数が 5 以上の W/C のみ示した。)

図 5.2.2-1 W/C と促進中性化速度係数の関係

$$A_A = 16.2(W/C - 0.356) \quad (5.2.2-2)$$

ここで、 $A_A$  : 促進中性化速度係数 (mm/√週)

W/C : 水セメント比, とする。

式 (5.2.2-2) は、決定係数  $R^2$  が 0.825 と高い相関性を示している。おおよそ W/C が 0.40 以下の範囲では中性化はあまり進行しないことが見て取れる。図 5.2.2-2 に、促進期間  $t_A$  と促進中性化深さ  $d_A$  の関係について、式 (5.2.2-2) の促進中性化速度係数  $A_A$  を用いた式 (5.2.2-1) を W/C 別にグラフ化し、表 5.2.1-2~5.2.1-4 の実験値をプロットしたものを示す。ある促進期間  $t_A$  の時点における個々の促進中性化深さ  $d_A$  の実験値には試験体ごとにばらつきが見られるが、促進期間  $t_A$  の進行とともに W/C が大きいほど 促進中性化深さ  $d_A$  が大きく増加する傾向を概ね良く捉えることができている。

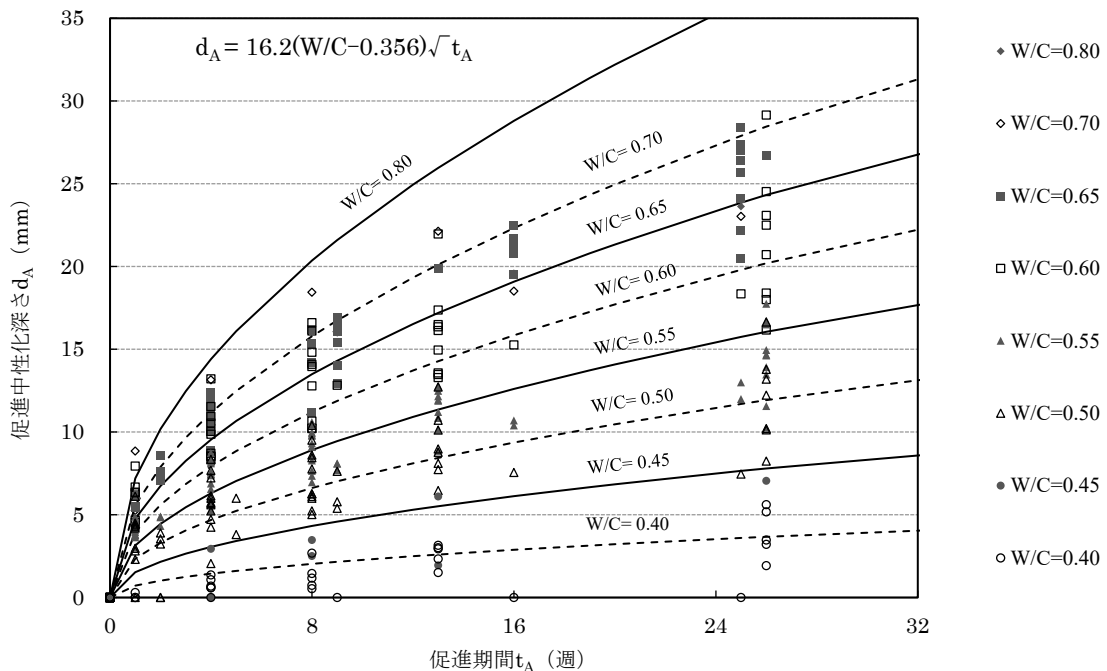


図 5.2.2-2 W/C 比別の促進期間と促進中性化深さの関係

なお、同一 W/C の条件においても、促進中性化速度係数  $A_A$  に違いが出る要因として、骨材や混和剤などの使用材料の違い、空気量、単位水量や単位セメント量などの調合の違い、締固めの差などコンクリート供試体の製作上の要因などが考えられる。ここに、表 5.2.1-2~5.2.1-4 のデータのうち同一 W/C の条件で比較検証が可能である水準として、促進中性化速度係数  $A_A$  と、フレッシュ試験の空気量および単位水量がある。空気量はデータ数で 10 以上あり、比較的広い範囲のデータがある W/C が 0.55 に限定して図 5.2.2-3 に示す。空気量が 3.7% から 6.0% に増加するにつれて  $A_A$  も大きくなる傾向が見られる。単位水量はデータ数で 10 以上ある W/C が 0.50, 0.55, 0.60 および 0.65 について図 5.2.2-4 に示す。単位水量の増加に伴い促進中性化速度係数  $A_A$  も大きくなる傾向が見られるが、W/C が 0.55 および 0.65 では負の相関を示しており、促進中性化速度係数  $A_A$  と単位水量の関係について本分析データからは統一的な傾向を確認することはできなかった。文献 15 編からデータを引用し、促進中性化速度係数  $A_A$  に若干のばらつきが見られるが、本分析データの促進環境条件は一定の範囲にあり、また養生条件は同一であることから、式 (5.2.2-2) は試験水準の範囲内における促進中性化の平均的な傾向を示すものとして妥当であると考えられる。

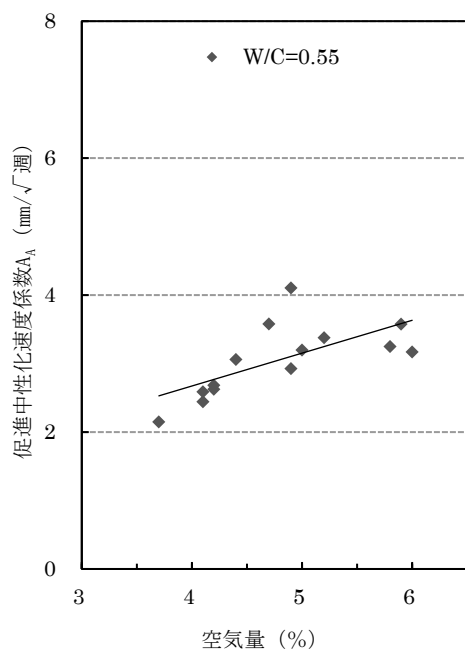


図 5.2.2-3 空気量と促進中性化速度係数の関係

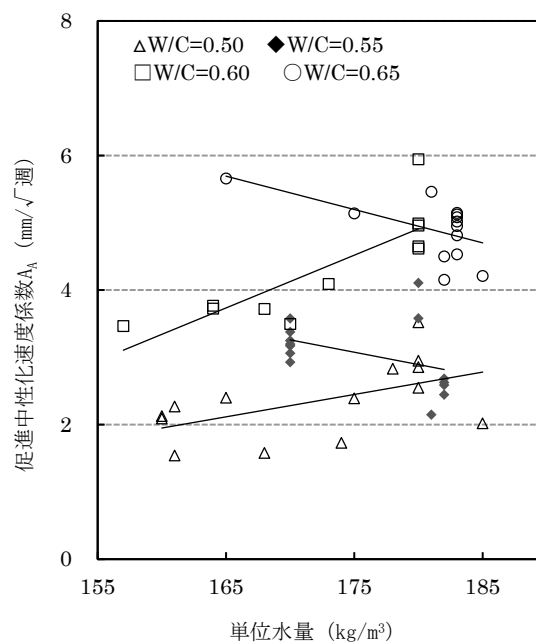


図 5.2.2-4 単位水量と促進中性化速度係数の関係

## (2) 圧縮強度と促進中性化速度係数の関係

中性化速度係数  $A$  は、コンクリートの圧縮強度  $\sigma_c$  と相関性が高いことがこれまでも多く報告されている。中性化速度係数  $A$  と圧縮強度  $\sigma_c$  の関係については、式 (5.2.2-3) に示すような圧縮強度  $\sigma_c$  に反比例するという提案<sup>5-19)</sup>や式 (5.2.2-4) に示すような圧縮強度  $\sigma_c$  の平方根に反比例するという提案<sup>5-20)</sup>などがある。

$$A=a(1/\sigma_c - b) \quad (5.2.2-3)$$

$$A=a(1/\sqrt{\sigma_c} - b) \quad (5.2.2-4)$$

ここで、 $A$  : 中性化速度係数 (mm/√年)

$\sigma_c$  : コンクリートの圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)

$a, b$  : 定数, とする。

図 5.2.2-5 に、表 5.2.1-2~5.2.1-4 のデータの材齢 28 日圧縮強度  $\sigma_{c28}$  (N/mm<sup>2</sup>) と促進中性化速度係数  $A_A$  をプロットし、あわせてその回帰式を示す。また、表 5.2.2-2 に、25~45N/mm<sup>2</sup> まで 5N/mm<sup>2</sup> ごとに  $\sigma_{c28}$  を区分した範囲における促進中性化速度係数  $A_A$  の平均値、標準偏差などを示す。ここでは、式 (5.2.2-3) に比べて、式 (5.2.2-4) の関係に基づいて実験値を用いた最小二乗法により回帰式を求めた式 (5.2.2-5) の方が、50N/mm<sup>2</sup> 付近から促進中性化速度係数  $A_A$  の実験値が 0 に近くなる傾向と乖離が少なく、比較的高い相関を示している。なお、式 (5.2.2-5) で促進中性化速度係数  $A_A$  が 0 になるのは計算上、77N/mm<sup>2</sup> 付近である。

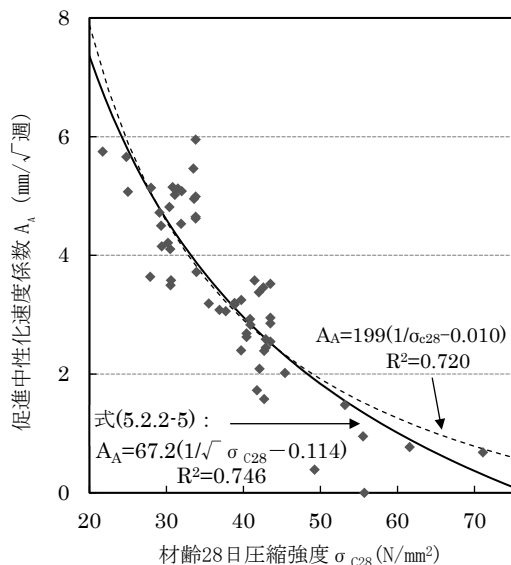


図 5.2.2-5 材齢 28 日圧縮強度と促進中性化速度係数の関係

表 5.2.2-2 材齢 28 日圧縮強度における強度区分ごとの促進中性化速度係数の実験値

$\sigma_{c28}$ (N/mm <sup>2</sup> )	25 ~ 30	30 ~ 35	35 ~ 40	40 ~ 45
データ数	6	17	7	17
最小値	3.77	3.50	2.40	1.58
最大値	5.14	5.95	3.25	3.58
平均値	4.56	4.67	3.05	2.64
標準偏差	0.49	0.65	0.27	0.55
変動係数	0.11	0.14	0.09	0.21

(中性化速度係数の単位はmm/√週で、表にはデータ数が 5 以上の強度区分のみ示した。)

$$A_A = 67.2(1/\sqrt{\sigma_{C28}} - 0.114) \quad (5.2.2-5)$$

ここで、 $A_A$ ：促進中性化速度係数（mm/√週）

$\sigma_{C28}$ ：材齢 28 日圧縮強度（N/mm<sup>2</sup>），とする。

図 5.2.2-6 に、促進期間  $t_A$  と促進中性化深さ  $d_A$  の関係について式 (5.2.2-5) を  $\sigma_{C28}$  別にグラフ化し、表 5.2.1-2～5.2.1-4 の実験値をプロットしたものを示す。傾向としては、W/C との関係を示した図 5.2.2-2 とほぼ同様の傾向で、促進期間  $t_A$  の進行とともに材齢 28 日圧縮強度  $\sigma_{C28}$  が小さいほど促進中性化深さ  $d_A$  が大きく増加する傾向にあることを概ね良く捉えることができている。ただし、表 5.2.2-2 で示すように、25～30N/mm<sup>2</sup> と 30～35N/mm<sup>2</sup> の両区間における促進中性化速度係数  $A_A$  の平均値がほぼ同じであるように、W/C の場合に比べて、材齢 28 日圧縮強度  $\sigma_{C28}$  の実験値とその回帰式との関係にはばらつきが見られる。また、50N/mm<sup>2</sup> 付近から促進中性化速度係数  $A_A$  の実験値がほぼ 0 のデータが見られるが、45～60 N/mm<sup>2</sup> にかけてのデータ数は十分ではない。促進中性化速度係数  $A_A$  と圧縮強度  $\sigma_C$  の関係を総括的に把握するうえで、式 (5.2.2-5) の適用性と精度の向上には、この範囲におけるデータの補完が必要である。

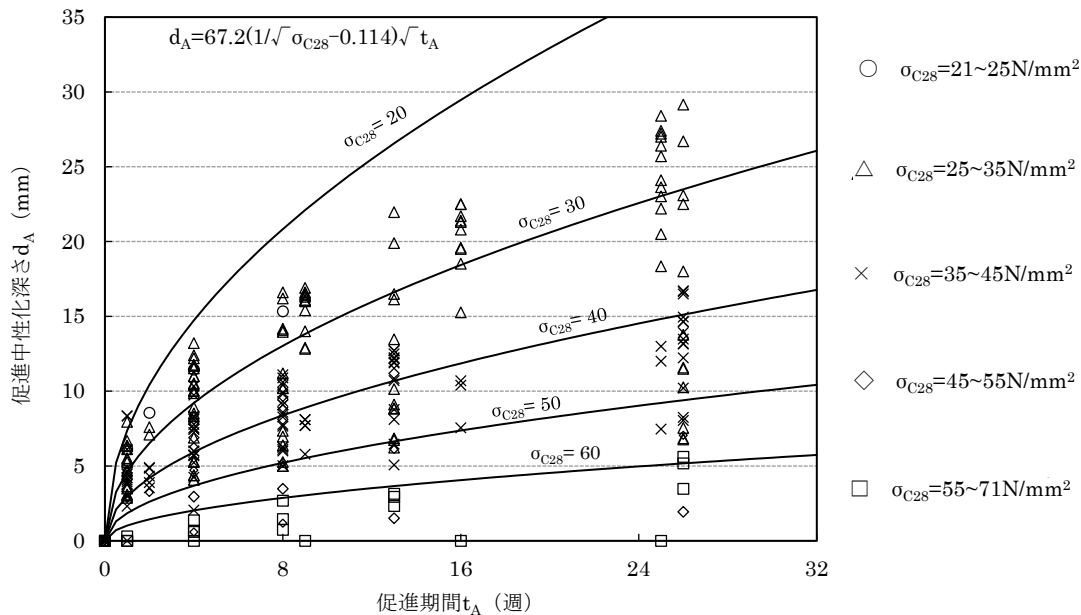


図 5.2.2-6 材齢 28 日圧縮強度別の促進期間と促進中性化深さの関係



図 5.2.2-7 に、W/C、材齢 28 日圧縮強度  $\sigma_{C28}$  および促進中性化速度係数  $A_A$  の関係を示す。促進中性化速度係数  $A_A$  は値に応じて、図中の点を分類して示している。W/C が大きく、材齢 28 日圧縮強度  $\sigma_{C28}$  が小さい範囲に促進中性化速度係数  $A_A$  の値が大きな点がプロットされている傾向がわかる。

一般的に圧縮強度  $\sigma_c$  と促進中性化速度係数  $A_A$  の関係を表す際には、標準養生供試体の材齢 28 日圧縮強度  $\sigma_{C28}$  を用いることが多いが、材齢 91 日圧縮強度  $\sigma_{C91}$  と促進中性化速度係数  $A_A$  の関係も検討した。図 5.2.2-8 に、材齢 91 日圧縮強度  $\sigma_{C91}$  と促進中性化速度係数  $A_A$  の関係を示す。ここでは、材齢 91 日圧縮強度  $\sigma_{C91}$  が示されている実験データだけを用いている。材齢 91 日圧縮強度  $\sigma_{C91}$  についても式 (5.2.2-4) の関係に基づいて回帰式を求めた。また、材齢 28 日圧縮強度  $\sigma_{C28}$  による式 (5.2.2-5) を破線であわせて示す。材齢 91 日圧縮強度  $\sigma_{C91}$  の平均値（データ数 28）が 44.1 N/mm<sup>2</sup> であるのに対して、材齢 28 日圧縮強度  $\sigma_{C28}$  の平均値（データ数 56）は 38.2 N/mm<sup>2</sup>、このうち材齢 91 日圧縮強度  $\sigma_{C91}$  の結果もある材齢 28 日圧縮強度  $\sigma_{C28}$  の平均値（データ数 28）は 37.4 N/mm<sup>2</sup> であるから平均して 18% 程度、強度が上昇している。これにより回帰式は全体的に図の右側に移動するとともに、曲線の勾配も若干高くなっている。材齢 28 日圧縮強度  $\sigma_{C28}$  が大きい供試体ほど材齢 91 日圧縮強度  $\sigma_{C91}$  の強度上昇率は比較的小さくなることを示しているがその差は極めてわずかである。

以上、既往の促進中性化試験のデータを整理し、促進中性化速度係数  $A_A$  と W/C および圧縮強度  $\sigma_c$  の関係を中心に総括的な傾向を検討した。

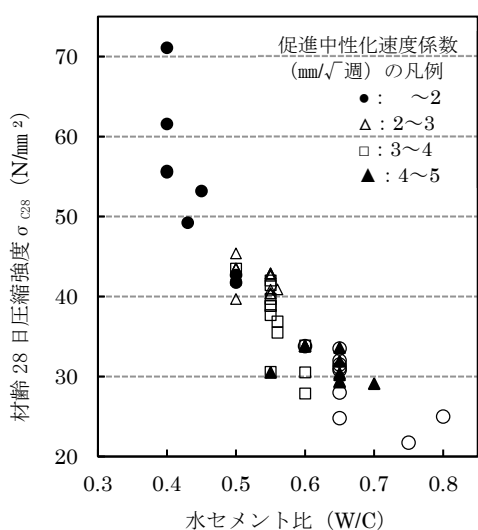


図 5.2.2-7 W/C、材齢 28 日圧縮強度と促進中性化速度係数の関係

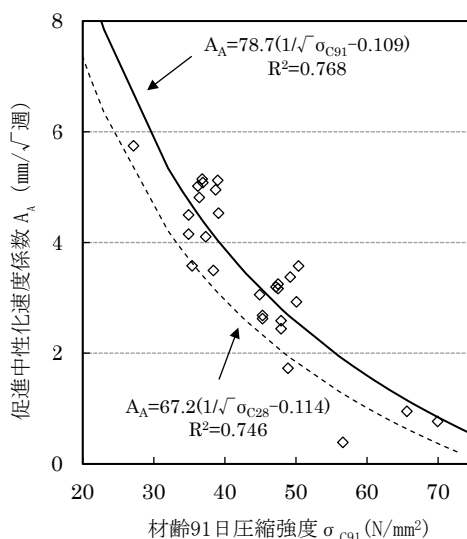


図 5.2.2-8 材齢 91 日圧縮強度と促進中性化速度係数の関係

## 5.3 促進中性化の進行と実環境における実建築物の中性化の進行の関係

### 5.3.1 中性化速度係数比の算出

第5章2節で分析した促進中性化試験の結果から、第4章で分析した実環境における実建築物の中性化の進行を予測する手法について検討する。促進中性化試験に対する実環境の中性化速度係数比  $R$  は次式で表される。

$$R=A_N/A_A' \quad (5.3.1-1)$$

ここで、 $R$ ：中性化速度係数比

$A_N$ ：実環境における中性化速度係数 (mm/√年)

$A_A'$ ：促進中性化速度係数 (mm/√年)，とする。

実環境では 0.03～0.05%の低  $CO_2$  濃度条件であるのに対し，促進試験では 5.0%の高  $CO_2$  濃度条件である。従来の方法では，式 (5.3.1-2)，式 (5.3.1-3) に示すように両環境における  $CO_2$  濃度と中性化期間の積である  $CO_2$  積算量 (%年) が同一になった時，両環境の中性化深さが同じ (実環境の中性化深さ  $d_N$ = 促進中性化深さ  $d_A$ ) になるという考え方に基づいて評価している。

$$C_A t_A' = C_N t_N \quad (5.3.1-2)$$

$$t_A' / t_N = C_N / C_A \quad (5.3.1-3)$$

ここで、 $C_A$ ：促進試験の  $CO_2$  濃度 (5.0%)，

$C_N$ ：実環境の  $CO_2$  濃度

$t_A'$ ：促進期間 (年)

$t_N$ ：実環境の中性化期間 (年)，とする。

従って，これまで中性化速度係数比  $R$  は式 (5.3.1-4)，式 (5.3.1-5) で表されていた<sup>例えば,5-21</sup>。よって，中性化速度係数比  $R$  は実環境の  $CO_2$  濃度  $C_N$  を屋外 0.05%と仮定した場合に 0.1 となる。

$$A_N / A_A' = \sqrt{t_A' / t_N} \quad (5.3.1-4)$$

$$R = \sqrt{C_N / C_A} \quad (5.3.1-5)$$

また，実環境の中性化期間  $t_N$  / 促進期間  $t_A'$  は， $CO_2$  濃度比  $5.0/0.05=100$  になり，促進中性化

試験によって実環境の中性化期間を 100 倍短縮していることになる。

一方、本研究で得られた促進中性化試験と実環境の実建築物の中性化の関係を図 5.3.1-1 に示す。図中の促進中性化速度係数  $AA'$  は式 (5.2.2-5) の単位を  $\sqrt{\text{年}}$  (1 年=52 週) に変換した式 (5.3.1-6) である。実環境における中性化速度係数  $A_N$  は屋外・床下環境における平均的な傾向を把握するために、前述の図 4.3.1-2 の(a)に示す全地域・全方位の屋外のデータに基づいて式 (5.2.2-3) を適用した式 (5.3.1-7) および図 4.3.1-2 の(f)に示す全地域・全方位の床下のデータに基づいて式 (5.2.2-3) を適用した式 (5.3.1-8) を一例として用いることとし図中にグラフ化した。R は、式 (5.3.1-6) と式 (5.3.1-7) および式 (5.3.1-6) と式 (5.3.1-8) をそれぞれ式 (5.3.1-1) に代入した結果を図中でグラフ化した。また、図 5.3.1-2 に、式 (5.3.1-6) と式 (5.3.1-7) および式 (5.3.1-6) と式 (5.3.1-8) の各中性化速度係数を用いて、それぞれの中性化深さが等しくなるとき (促進中性化深さ  $d_A =$  実環境の中性化深さ  $d_N$ ) の実環境の中性化期間  $t_N /$  促進期間  $t_A'$  および実環境の  $\text{CO}_2$  濃度  $C_N$  を屋外 0.05% と仮定した場合に式 (5.3.1-2) が成立するときの実環境の中性化深さ  $d_N /$  促進中性化深さ  $d_A$  を求めて圧縮強度との関係をそれぞれグラフ化した。ただし、ここで適用の対象とする圧縮強度の範囲は、4 章の検討において実建築物でのデータが多くあった 20~50N/mm<sup>2</sup> とした。表 5.3.1-1 に、図 5.3.1-1 および図 5.3.1-2 の縦軸の各数値を 5N/mm<sup>2</sup> ごとに区分して示す。なお、圧縮強度について、促進中性化試験では材齢 28 日圧縮強度を用いているのに対して、実建築物では 15 年以上経過してから採取したコア供試体の圧縮強度を用いている。コア供試体の圧縮強度は、材齢 28 日圧縮強度と異なるが、ここでは同じと見なして検討を行った。

$$AA' = \sqrt{52} \times 67.2 (1/\sqrt{\sigma_c} - 0.114) \quad (5.3.1-6)$$

$$A_N = 152 (1/\sigma_c - 0.006) \quad (5.3.1-7)$$

$$A_N = 138 (1/\sigma_c - 0.013) \quad (5.3.1-8)$$

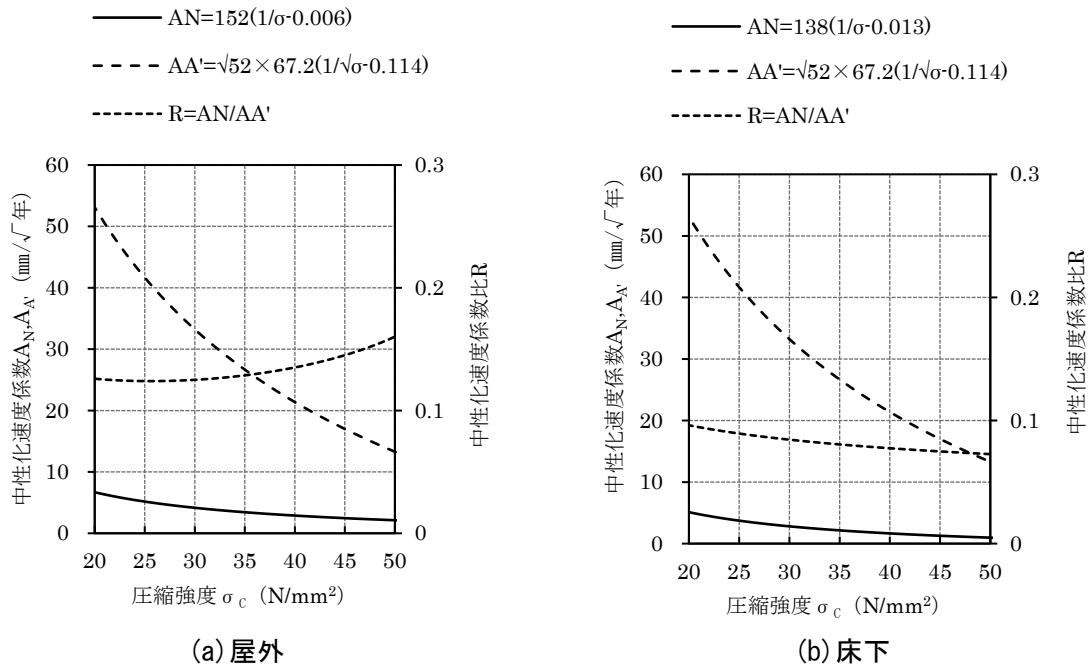


図 5.3.1-1 圧縮強度と中性化速度係数および中性化速度係数比の関係

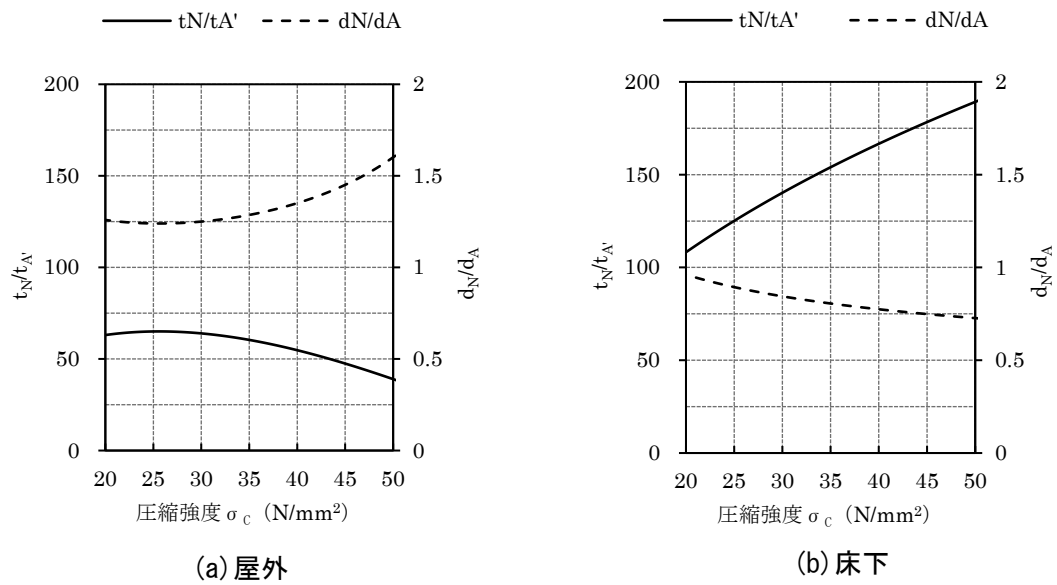


図 5.3.1-2 実環境の中性化期間  $t_N$ /促進期間  $t_{A'}$  および実環境の中性化深さ  $d_N$ /促進中性化深さ  $d_A$  と圧縮強度の関係

### 5.3.2 中性化速度係数比の比較および考察

屋外と床下では、中性化速度係数  $A_N$  と圧縮強度の関係に違いがあるため、中性化速度係数比  $R$  の傾向についても違いが見られた。促進中性化試験により  $CO_2$  の拡散は促進されるが、促進中性化速度係数  $A_A'$  および屋外での中性化速度係数  $A_N$  がほぼ 0 になる圧縮強度の値に大きな差はないため、中性化速度係数比  $R$  は圧縮強度が大きくなるに伴い 0.12 から 0.16 程度に漸増していく傾向にある。一方、高湿度環境である床下では、屋外と比較して中性化の進行が抑制され、中性化速度係数  $A_N$  がほぼ 0 になる圧縮強度の値が促進中性化速度係数  $A_A'$  の場合に比べて小さくなることによる影響を受けて、圧縮強度が大きくなるに伴い逆に中性化速度係数比  $R$  は 0.10 から 0.07 程度に漸減していく傾向にある。これは従来の計算で用いられている中性化速度係数比  $R=0.1$  に対し、実環境における実建築物の中性化速度係数比  $R$  は一律ではなく強度や環境条件によって違いが表れることにおいて、一致しない結果となった。

なお、7年間の屋外暴露試験を行った押田らの研究<sup>5-22)</sup>では、普通ポルトランドセメントを使用したコンクリートにおける中性化速度係数比  $R$  の関係式 ( $R=0.227/(W/B)-0.342$ ,  $W/B$ : 水結合材比) が示されており、 $W/B$  0.4~0.6 (材齢 28 日圧縮強度で約 31~54N/mm<sup>2</sup>) の範囲での中性化速度係数比  $R$  は 0.04~0.23 であった。本研究では、20~50N/mm<sup>2</sup> の範囲における中性化速度係数比  $R$  は屋外では 0.12~0.16, 床下では 0.10~0.07 であるので、押田らの研究と比較すると、30N/mm<sup>2</sup> 付近では 2~3 倍程度大きい、圧縮強度が大きい範囲では逆に小さくなっている。

また、本検討における実環境の中性化期間  $t_N$ /促進期間  $t_A'$  は、屋外では 39~65, 床下では 108~189 で、従来の計算による 100 と一致しないため、実環境の中性化期間  $t_N$ /促進期間  $t_A'$  は  $CO_2$  濃度に単純に比例すると言えない結果である。さらに、両環境が同じ  $CO_2$  積算量になった時、本検討における実環境の中性化深さ  $d_N$ /促進中性化深さ  $d_A$  は屋外では 1.2 以上、床下では 1 未満であり、実環境の中性化深さ  $d_N$ =促進中性化深さ  $d_A$  とはならなかった。

本研究では、 $CO_2$  濃度 5.0% で期間  $t_A'$  年の促進試験を行った時の中性化深さ  $d_A$  のコンクリートについて、実環境 (屋外  $CO_2$  濃度 0.05%) における実建築物として中性化期間  $t_N$  年経過した屋外側での平均的な中性化深さ  $d_N$  を予測すると次式で計算できる。

$$d_N=R \cdot A_A' \sqrt{t_N} \quad (5.3.2-1)$$

$$d_N=R \cdot d_A \sqrt{t_N/t_A'} \quad (5.3.2-2)$$

ただし、中性化速度係数比  $R$  の値は表 5.3.2-1 により、本研究データに基づいた平均的な数値としての提示である。

なお、実建築物の中性化の進行は、前述の図 4.3.1-2 に示すように湿度や日射などの環境条件や施工条件・養生条件の違いによる影響を受けることから、ここで示す中性化速度係数比  $R$  は促進中性化試験と実環境との  $\text{CO}_2$  濃度以外の要因が包含された係数になっている。第 4 章で述べたように、床下環境は雨がかりや日射がなく、特に中性化に影響を及ぼす湿度も安定し、屋外に比べて環境条件の差異が少ないので、回帰式による中性化速度係数の相関も屋外より床下が高かった。よって、ここで提示した中性化速度係数比  $R$  も床下の方が比較的精度が高いと考えられる。

今後、様々な環境条件における中性化データを収集・整理し、条件に応じた中性化速度係数比  $R$  を提示する必要があると考える。

表 5.3.2-1 促進中性化と実環境における実建築物の中性化の関係

(a) 屋外

圧縮強度 ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )	$A_N$ ( $\text{mm}/\sqrt{\text{年}}$ )	$A_A'$ ( $\text{mm}/\sqrt{\text{年}}$ )	$R$ ( $=A_N/A_A'$ )	$t_N/t_A'$ ( $d_N=d_A$ )	$d_N/d_A$ ( $C_N t_N = C_A t_A'$ )
20~25	6.7 ~ 5.2	53.1 ~ 41.7	0.13 ~ 0.12	63.1 ~ 65.0	1.26 ~ 1.24
25~30	5.2 ~ 4.2	41.7 ~ 33.2	0.12 ~ 0.13	65.0 ~ 64.0	1.24 ~ 1.25
30~35	4.2 ~ 3.4	33.2 ~ 26.7	0.13 ~ 0.13	64.0 ~ 60.4	1.25 ~ 1.29
35~40	3.4 ~ 2.9	26.7 ~ 21.4	0.13 ~ 0.14	60.4 ~ 54.8	1.29 ~ 1.35
40~45	2.9 ~ 2.5	21.4 ~ 17.0	0.14 ~ 0.15	54.8 ~ 47.5	1.35 ~ 1.45
45~50	2.5 ~ 2.1	17.0 ~ 13.4	0.15 ~ 0.16	47.5 ~ 39.0	1.45 ~ 1.60
20~50	6.7 ~ 2.1	53.1 ~ 13.4	0.12 ~ 0.16	65.0 ~ 39.0	1.24 ~ 1.60

(b) 床下

圧縮強度 ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )	$A_N$ ( $\text{mm}/\sqrt{\text{年}}$ )	$A_A'$ ( $\text{mm}/\sqrt{\text{年}}$ )	$R$ ( $=A_N/A_A'$ )	$t_N/t_A'$ ( $d_N=d_A$ )	$d_N/d_A$ ( $C_N t_N = C_A t_A'$ )
20~25	5.1 ~ 3.7	53.1 ~ 41.7	0.10 ~ 0.09	108.2 ~ 125.1	0.96 ~ 0.89
25~30	3.7 ~ 2.8	41.7 ~ 33.2	0.09 ~ 0.08	125.1 ~ 140.2	0.89 ~ 0.84
30~35	2.8 ~ 2.1	33.2 ~ 26.7	0.08 ~ 0.08	140.2 ~ 154.0	0.84 ~ 0.81
35~40	2.1 ~ 1.7	26.7 ~ 21.4	0.08 ~ 0.08	154.0 ~ 166.6	0.81 ~ 0.77
40~45	1.7 ~ 1.3	21.4 ~ 17.0	0.08 ~ 0.07	166.6 ~ 178.3	0.77 ~ 0.75
45~50	1.3 ~ 1.0	17.0 ~ 13.4	0.07 ~ 0.07	178.3 ~ 189.0	0.75 ~ 0.73
20~50	5.1 ~ 1.0	53.1 ~ 13.4	0.10 ~ 0.07	108.2 ~ 189.0	0.96 ~ 0.73

## 5.4 まとめ

本章では、促進中性化試験の結果から実環境下における実建築物の中性化の進行を予測するために必要となるデータの整理・分析と予測手法の提案を行うことを目的とした。

結論を以下に示す。

- (1) 15 件の文献調査を行い、普通ポルトランドセメントを使用したコンクリートの促進中性化試験 68 データによる促進中性化の総括的傾向を検討し、促進中性化速度係数と水セメント比および促進中性化速度係数と圧縮強度の関係式を示した。
  
- (2) 第 4 章および本章の分析結果を用いて、促進中性化試験に対する実環境の中性化速度係数比  $R$  の算出事例を示した。実環境における実建築物の屋外側の平均的な中性化の例では、圧縮強度が大きくなるほど  $R$  は大きくなる傾向にあり、 $0.12\sim 0.16$  であった。一方、湿度が高い環境である床下側では、圧縮強度が大きくなるほど  $R$  は逆に小さくなる傾向にあり、 $0.10\sim 0.07$  であった。これらは、従来の考え方で求めた場合の中性化速度係数比  $0.1$  と一致しない結果であった。

## 参考文献

なお、5-2)～5-16)は、本章の検討で用いた促進中性化データの引用文献である。

- 5-1) 日本建築学会：高耐久性鉄筋コンクリート造設計施工指針（案）・同解説，1991.7
- 5-2) 黒島毅ほか1名：砕石粉を用いた高流動コンクリートに関する研究，その5，日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1，pp.239-240，1995.8
- 5-3) 中村則清ほか3名：コンクリートの促進中性化試験結果のばらつきに関する実験的検討，2008年度日本建築学会関東支部研究報告集，pp.109-112，2009.3
- 5-4) 中村則清ほか4名：コンクリートの促進中性化に及ぼす試験方法上の要因の影響，その4，日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1，pp.1149-1150，2005.9
- 5-5) 中村則清ほか3名：コンクリートの促進中性化に及ぼす試験方法上の要因の影響，コンクリート工学年次論文集，vol.25，No.1，pp.761-766，2003
- 5-6) 大和功一郎ほか3名：PCaコンクリートの促進中性化に関する研究，コンクリート工学年次論文集，vol.31，No.1，pp.943-948，2009
- 5-7) 和田利之ほか2名：低発熱型セメントを用いたコンクリートの中性化特性，コンクリート工学年次論文集，vol.23，No.2，pp.451-456，2001
- 5-8) 大和功一郎ほか3名：各種PCaコンクリートの促進中性化に関する研究，コンクリート工学年次論文集，vol.32，No.1，pp.647-652，2010
- 5-9) 黒岩秀介ほか5名：保水性を有する新収縮低減剤を混和したコンクリートの実用化，その2，日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1，pp.455-456，2011.8
- 5-10) 山下修平ほか3名：各種セメントを用いたコンクリートの促進中性化試験方法の検討，2010年度日本建築学会関東支部研究報告集，pp.45-48，2011.3
- 5-11) 久保田浩ほか3名：中性化抑制効果に優れた水系ふっ素樹脂クイヤ塗装仕様の開発，促進中性化試験結果，日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1，pp.463-464，2008.9
- 5-12) 守屋健一ほか5名：フライアッシュコンクリートの中性化に関する研究，その1，日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1，pp.389-390，2007.8
- 5-13) 松本幸太郎ほか5名：降雨の影響を受ける構造体コンクリートの中性化速度に関する研究，日本建築学会中国支部研究報告集，第36巻，pp.33-36，2013.3
- 5-14) 松浦誠司ほか3名：使用材料が吹付けコンクリートの耐久性に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，vol.22，No.2，pp.1375-1380，2000



- 5-15) 石川嘉崇ほか2名：各種スラグ細骨材との性状比較による IGCC 石炭溶融スラグのコンクリート用細骨材としての有用性の検討, 日本建築学会構造系論文集, 第 676 号, pp.799-805, 2012.6
- 5-16) 全洪珠ほか1名：コンクリートの強度および耐久性に及ぼすフライアッシュの種類・置換率の影響に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 602 号, pp.1-7, 2006.4
- 5-17) 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, p.84, 1976
- 5-18) 和泉意登志：コンクリートの中酸化速度に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 394 号, pp.17-26, 1988.12
- 5-19) 和泉意登志：コンクリートの中酸化に及ぼすセメントの種類, 調合および養生条件の影響について, 第7回コンクリート工学年次講演会論文集, pp.117-120, 1985
- 5-20) 馬場明生ほか3名：グラウトしたコンクリートメーソンリーの中酸化, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 498 号, pp.1-6, 1997.8
- 5-21) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計施工指針・同解説, 2016
- 5-22) 押田文雄ほか5名：中庸熱フライアッシュセメントを使用したコンクリートの中酸化速度係数, 日本建築学会技術報告集, Vol.20, No.45, pp.451-456, 2014.6

## 第6章 実建築物のモルタル仕上げが施されたコンクリート部分における中性化の実態と評価

### 6.1 はじめに

本章では、建築物の外装仕上げとして、現場調査のセメントモルタル塗りが施された（以下、モルタル仕上げという）コンクリート部分を対象にして、モルタル仕上げの中性化抵抗やコンクリートの中性化に環境条件が及ぼす影響の実態を把握し、その定量的な評価を行うために、まずコア採取による圧縮強度、中性化深さおよびモルタル塗厚の測定ならびに実建築物の躯体表面における温度・相対湿度の実測などの調査を行った。ここで、モルタル仕上げを対象としたのは、昭和40年代までに建設されたRC造建築物の多くは、型枠の施工精度などの問題からコンクリート躯体のうえにモルタル仕上げが施されており、既存ストックの有効活用において当面、検討対象となる建設年代の建築物の仕上げとして一般的であるからである。モルタル仕上げのうえには、色モルタル、リシンなどが吹き付けられていたことが多い。なお、ここでは他の仕上げ材の下地調整材として用いられる薄塗りのモルタルは対象外であり、塗厚が10 mm程度以上あるモルタル塗りが仕上げ材とされているものを対象としている。

具体的研究内容としては、まず、集合住宅100棟を対象にして、その南面および北面から採取したコア供試体の中性化深さとモルタル仕上げの塗厚などを調査し、方位別におけるコンクリートの中性化進行の差異を概略的に把握した。

次に、それらのデータを用いて、仕上げ材による中性化抑制効果を中性化遅延深さとして考慮した中性化進行の式を適用して、モルタル仕上げ部分の中性化抵抗および中性化速度係数を方位別に求めた。さらに、方位による環境条件の違い、すなわち温度や相対湿度の差異の面から中性化傾向を考察した。

### 6.2 調査方法

調査方法について、以下に示す。ただし、実建築物における温度・相対湿度の実測は、第4章2節4項「実建築物における温度・相対湿度の実測の概要」と同様であるため、本節での記載は省略した。

#### 6.2.1 コア供試体を採取した建築物の概要

本章で調査対象とした建築物の概要を表6.2.1-1に、そこで採取されたコンクリートコア供試

体の概要を表 6.2.1-2 に示す。建築物は、関東・近畿圏の市街地で余裕のある隣棟間隔を確保して配置された団地内にある 5 階建ての鉄筋コンクリート造集合住宅 100 棟である。建築物の竣工年は 1968～1975 年で、その分布を図 6.2.1-1 に示す。使用されたコンクリートはいずれも普通コンクリートで、セメントは普通ポルトランドセメント、設計基準強度は 18N/mm<sup>2</sup> である。建築物の形状は、原則、東西軸が長辺方向となるほぼ整形な長方形平面で、南面にバルコニー、北面に階段室や共用廊下がある。なお、一部に、建築物の長辺方向が東西軸から最大で 45 度程度、時計回りもしくは反時計回り方向に振れている建築物が含まれている。

表 6.2.1-1 調査対象とした建築物の概要

項目	内容
構造種別・用途	鉄筋コンクリート造 集合住宅
階数	地上 5 階建て
棟数	100 棟
地域 (地域別棟数)	東京都(4 棟), 埼玉県(21 棟), 京都府(28 棟), 大阪府(45 棟), 兵庫県(2 棟)
竣工年	1968～1975 年
コンクリート種類	普通コンクリート
セメント種類	普通ポルトランドセメント
設計基準強度*1	18N/mm <sup>2</sup>

(\*1 建設時は kg/cm<sup>2</sup> であるが、変換係数 10 で SI 単位表記にした。)

表 6.2.1-2 コンクリートコア供試体の概要

	南面の採取コア	北面の採取コア
コア採取部位	住戸外壁	階段室手摺り壁
採取部位の仕上げ材	モルタル仕上げの上, リシン吹付け	モルタル仕上げの上, リシン吹付け
中性化深さ測定年	2002～2006 年	2003～2010 年
測定時の経過年数	28～37 年	30～42 年
コア供試体本数	100 本	100 本
中性化深さデータ数	(外側) 100 データ	(外側) 100 データ (内側) 100 データ

これらの建築物の南面と北面から直径 75 mm または 100 mm のコア供試体を仕上げ材を含む構造体コンクリートを貫通して採取した。竣工から中性化深さ測定時までの経過年数の分布を図 6.2.1-2 に示すが、31～34 年のデータが中心である。南面のコア供試体は、空き家の住戸改修で外壁にクーラー用スリーブを設置するためにコア抜きしたことで得られたコアをコンクリートの耐久性調査用に準用したものである。北面のコア供試体は、当該建築物の大規模修繕工事を行う際に、コンクリートの耐久性を調査することを目的に階段室や共用廊下の手摺り壁からコア供試体を採取したものである。なお、採取部位の仕上げ材は、いずれもモルタル仕上げの上にリシン吹付けである。モルタルの仕様は、設計図書の工事共通仕様書で、セメントと砂の容積調合比が下塗りで 1:2.5、中塗りおよび上塗りで 1:3 であることが明記されていた以外の情報は不明である。

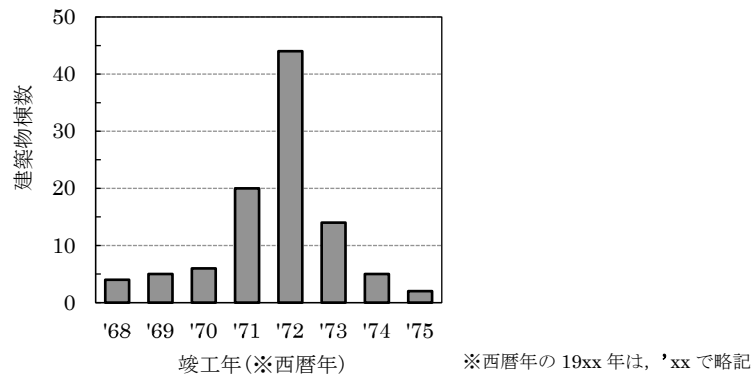


図 6.2.1-1 竣工年の分布

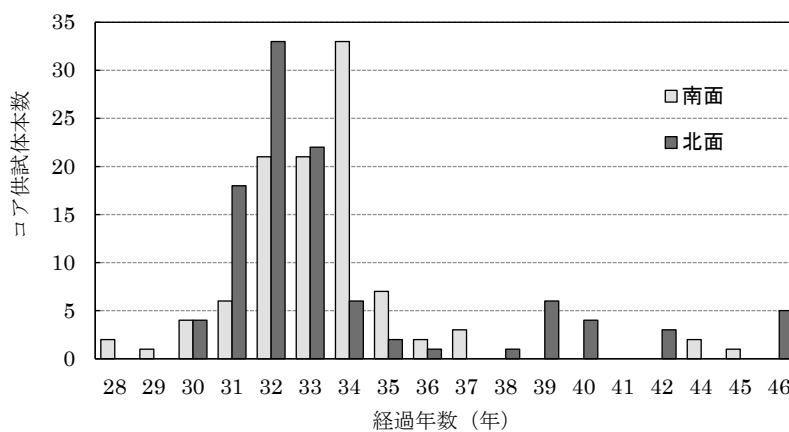


図 6.2.1-2 試験時の経過年数の分布

## 6.2.2 コア供試体の採取位置および採取方法

コア採取位置の例として平面図を図 6.2.2-1 に、断面図を図 6.2.2-2 に示す。建築物の南面および北面から各 1 本採取されたコア供試体について、圧縮強度試験，中性化深さの測定，モルタル仕上げの塗厚の測定を行った。本調査で検討対象とする中性化深さのデータは，南面についてはコア供試体の日射を受ける側となる外側端部で測定した 100 データ，北面についてはコア供試体の外側および内側の端部で測定した各 100 データの合計 300 データである。これらの採取位置の環境条件は，例えば日本建築学会「鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計施工指針・同解説」6-1) が定義する雨がかり環境「降雨時に直接表面に雨滴がかかる環境を言い，外装部やバルコニー，雨ざらしの内廊下や階段室，屋上まわりなどが該当する」と見なすことができると考える。

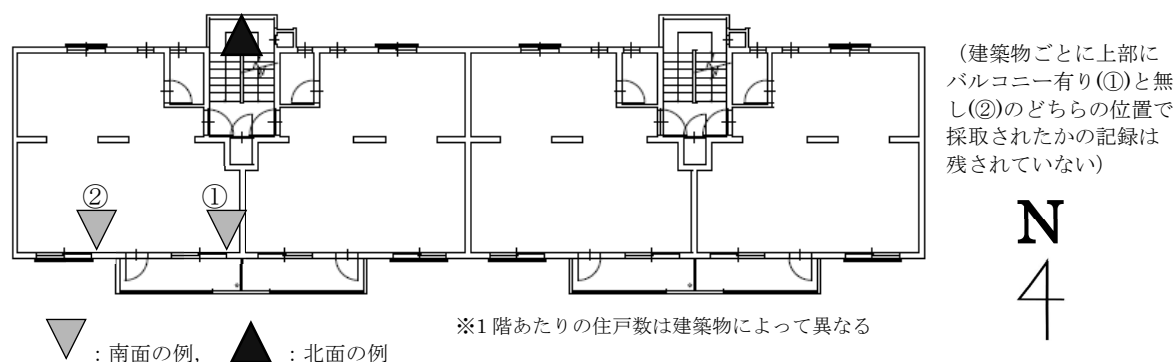


図 6.2.2-1 コア採取位置の例 (平面図)

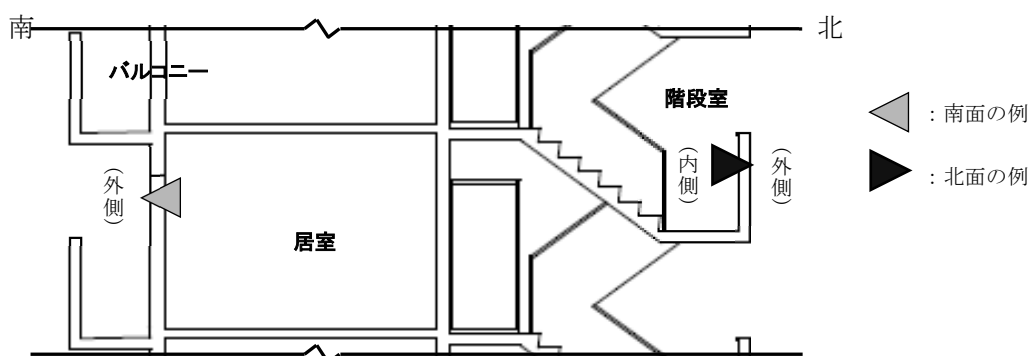


図 6.2.2-2 コア採取位置の例 (南北方向断面図)

しかし、北面における階段室手摺壁の内側は、雨の吹き込み方向に対して裏面になるため、傾斜角がある雨滴を直接受ける外側<sup>6-2)</sup>に比べると雨滴による濡れが少ないと考えられることから、本調査の中性化進行の分析では、「北面の外側」と「北面の内側」として、方位に加えて雨の吹き込み方向に対しての区別をした。また、南面の採取位置は、上部にバルコニーなどがある場合とない場合が想定されるが、建築物ごとにそれを特定できる記録が残されていないため、南面のデータではその位置での違いを区別していない。

### 6.2.3 圧縮強度の試験方法および中性化深さ・モルタル仕上げの塗厚の測定方法

コア供試体 1 本に対して圧縮強度試験と中性化深さ測定の両方を行った。コンクリートの圧縮強度試験は JIS A 1107 に準拠、中性化深さの測定は JIS A 1152 に準拠して行い、フェノールフタレイン 1% 溶液を割裂面に噴霧して測定した。なお、モルタル仕上げの塗厚はノギス、コンベックスなどにより測定した。なお、本論文中に示す中性化深さとは、特記しない限り、コンクリートとモルタル仕上げの境界面から測定したコンクリート部分のみの数値を示し、モルタル仕上げの塗厚は含めていない。

### 6.2.4 中性化進行の理論モデルの適用による中性化の評価方法

モルタル仕上げが施されたコンクリートの中性化進行は、第 3 章 2 節 2 項 (2) の解析例で示したように式(6.2.4-1)によって表されるモデルが李・梶田によって提案されている<sup>6-3)</sup>。

$$d_c = A_c \left\{ \sqrt{(t - T) + R^2} - R \right\} \quad (6.2.4-1)$$

ここで、 $d_c$  : コンクリートの中性化深さ (mm)

$A_c$  : コンクリートの中性化速度係数 (mm/ $\sqrt{\text{年}}$ )

$R$  : モルタル仕上げの中性化抵抗 ( $\sqrt{\text{年}}$ )

$t$  : 経過期間 (年)

$T$  : モルタル仕上げ全断面の中性化期間 (年)

で、 $A_c$ ,  $R$ ,  $T$  は次のように表される。

$$A_c = \sqrt{\frac{2D_{cc} \cdot C_0}{H}}, \quad R = \sqrt{\frac{H \cdot D_{cc} \cdot D_m^2}{2D_{cm}^2 \cdot C_0}}, \quad T = \frac{H_m \cdot D_m^2}{2D_{cm} \cdot C_0}$$

ここで、 $D_{cc}$ ：コンクリートの拡散係数 ( $\text{mm}^2/\text{年}$ )

$H$ ：コンクリートの単位体積あたりの  $\text{Ca(OH)}_2$  濃度 ( $\text{mol}/\text{mm}^3$ )

$C_0$ ：モルタル仕上げ表面の  $\text{CO}_2$  濃度 ( $\text{mol}/\text{mm}^3$ )

$D_{cm}$ ：モルタル仕上げの拡散係数 ( $\text{mm}^2/\text{年}$ )

$D_m$ ：モルタル仕上げの塗厚 ( $\text{mm}$ )

$H_m$ ：モルタル仕上げの単位体積あたりの  $\text{Ca(OH)}_2$  濃度 ( $\text{mol}/\text{mm}^3$ )，とする。

李らのモデルによる中性化深さの提案式(6.2.4-1)は、 $T=R^2$ のときに、馬場らの提案式<sup>64)</sup>である式(6.2.4-2)と同じになる。第3章2節2項(2)における建築物3棟の解析例では、結果として、いずれも  $T=R^2$ であり、式(6.2.4-2)とほぼ同じになった。

多数の実建築物の調査結果に基づき、モルタル仕上げ部分の中性化抵抗および中性化速度係数を算出するにあたっては、 $T=R^2$ が成立する条件であると仮定して、馬場らが提案した中性化抑制効果を中性化遅延深さ  $A_c \cdot R$ として評価すると簡便であるため、本章の検討では、便宜的に式(6.2.4-2)を適用した。また、このとき、モルタル仕上げの中性化抵抗  $R$ は、式(6.2.4-3)で表される。

$$d_c = A_c(\sqrt{t} - R) \tag{6.2.4-2}$$

$$R = D_m/A_m \tag{6.2.4-3}$$

ここで、 $A_m$ ：モルタル仕上げの中性化速度係数 ( $\text{mm}/\sqrt{\text{年}}$ )，とする。

## 6.3 調査結果および考察

### 6.3.1 圧縮強度・中性化深さ・モルタル仕上げの塗厚

圧縮強度、中性化深さおよびモルタル仕上げの塗厚について、平均値、標準偏差および変動係数を表 6.3.1-1 に、建築物ごとの測定結果を表 6.3.1-2～6.3.1-4 に示す。

#### (1) 圧縮強度

圧縮強度  $\sigma_c$  の度数分布を図 6.3.1-1 に示す。南面のコンクリートの圧縮強度  $\sigma_c$  の平均値が 22.6 N/mm<sup>2</sup>、分布の最頻値の範囲が 21.0～23.9 N/mm<sup>2</sup> であるのに対して、北面は平均値が 26.3 N/mm<sup>2</sup>、最頻値の範囲が 18.0～20.9 N/mm<sup>2</sup> である。表 6.3.1-2 によれば圧縮強度  $\sigma_c$  の平均値は北面の方が高い傾向にあり、変動係数はほぼ同じである。同一建築物での南面の圧縮強度  $\sigma_c$  と北面の圧縮強度  $\sigma_c$  をプロットした結果を図 6.3.1-2 に示す。北面の圧縮強度  $\sigma_c$  に対する南面の圧縮強度  $\sigma_c$  の比率の平均値は 0.89 であった。北面は、日射が当たらないため、南面に比べるとコンクリート打設後の養生条件として湿潤状態が保たれやすく、相対的に高い強度発現になったことが考えられる。

表 6.3.1-1 圧縮強度・中性化深さ・モルタル仕上げの塗厚の平均値・標準偏差・変動係数

試験・測定項目		南面	北面・外側	北面・内側
圧縮強度 $\sigma_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	データ数	n=100	n=100	
	平均値	22.6	26.3	
	標準偏差	5.1	5.9	
	変動係数	22.6%	22.4%	
中性化深さ $d_c$ (mm)	データ数	n=100	n=100	n=100
	平均値	13.1	3.3	4.0
	標準偏差	9.5	1.8	2.9
	変動係数	72.5%	54.5%	72.5%
モルタル仕上げ の塗厚 $D_m$ (mm)	データ数	n=100	n=100	n=100
	平均値	24.5	25.4	24.8
	標準偏差	7.0	10.1	8.3
	変動係数	28.6%	39.8%	33.5%

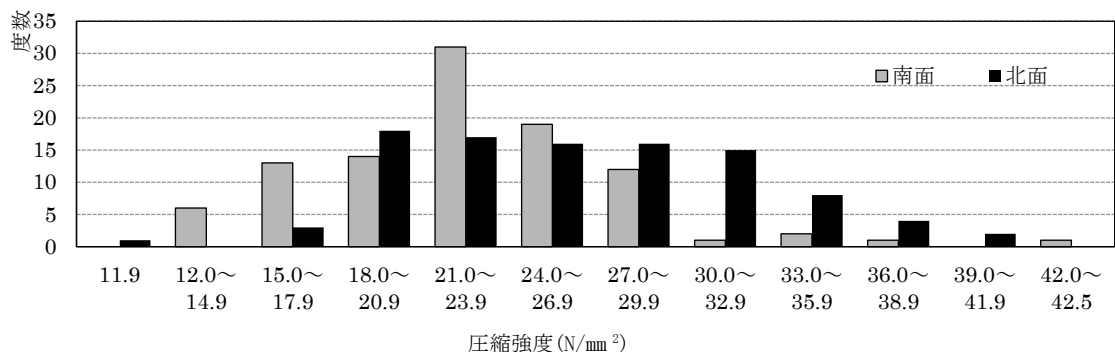


図 6.3.1-1 圧縮強度の度数分布



表 6.3.1-2 建築物から採取したコア供試体の測定時経過年数ならびに圧縮強度・中性化深さ・モルタル仕上げの塗厚の測定結果 (1/3)

建物 番号	所在地	竣工年 (西暦)	建物 階数	設計基準 強度 $F_c$ ( $N/mm^2$ )	南面(建築物外周壁) 採取コア				北面(階段室手摺壁) 採取コア					
					測定時 経過 年数(年)	圧縮 強度 $\sigma_c$ ( $N/mm^2$ )	雨がかり環境・外側		測定時 経過 年数(年)	圧縮 強度 $\sigma_c$ ( $N/mm^2$ )	雨がかり環境・外側		雨がかり環境・内側	
							中性化 深さ $d_c$ (mm)	モルタル 塗厚 $D_m$ (mm)			中性化 深さ $d_c$ (mm)	モルタル 塗厚 $D_m$ (mm)	中性化 深さ $d_c$ (mm)	モルタル 塗厚 $D_m$ (mm)
1	東京都	1968	5	18	37	17.7	2.2	18	42	37.1	6.8	16	4.1	35
2	東京都	1968	5	18	37	18.7	47.1	9	42	18.2	2.8	23	4.8	17
3	東京都	1968	5	18	37	23.7	5.8	19	42	27.2	1.8	7	3.7	22
4	東京都	1969	5	18	36	19.6	17.0	28	39	19.6	2.7	17	2.0	40
5	埼玉県	1970	5	18	35	21.4	18.3	23	36	23.0	1.6	22	3.6	22
6	埼玉県	1972	5	18	33	27.3	2.9	28	32	38.6	2.3	24	2.9	22
7	埼玉県	1972	5	18	33	25.6	3.7	24	32	35.6	3.6	18	2.8	31
8	埼玉県	1972	5	18	34	27.0	20.4	24	32	30.5	3.5	18	3.9	10
9	埼玉県	1972	5	18	31	27.4	2.7	30	32	27.3	6.1	13	3.5	22
10	埼玉県	1972	5	18	34	26.9	3.4	24	32	22.0	3.7	17	11.8	15
11	埼玉県	1972	5	18	34	16.9	4.5	28	32	16.9	8.2	12	6.4	26
12	埼玉県	1973	5	18	32	29.4	6.9	28	31	27.1	3.4	32	4.2	29
13	埼玉県	1973	5	18	32	23.6	11.9	24	31	29.2	2.7	30	2.5	19
14	埼玉県	1973	5	18	32	20.5	22.3	24	31	24.8	4.8	24	7.4	27
15	埼玉県	1973	5	18	32	26.2	8.1	24	31	33.8	2.4	26	4.8	11
16	埼玉県	1973	5	18	32	38.1	2.5	18	31	29.4	3.5	22	5.3	35
17	埼玉県	1973	5	18	32	29.9	3.4	25	31	24.4	3.6	23	3.2	25
18	埼玉県	1973	5	18	30	18.2	6.6	31	31	28.1	7.8	9	5.0	14
19	埼玉県	1973	5	18	33	28.6	1.9	29	31	30.2	3.9	12	4.1	17
20	埼玉県	1973	5	18	33	29.6	16.7	24	31	39.3	3.2	33	4.0	16
21	埼玉県	1973	5	18	32	24.9	14.3	28	31	33.5	3.6	17	4.5	40
22	埼玉県	1973	5	18	30	28.0	9.4	20	31	39.9	2.4	26	3.8	17
23	埼玉県	1973	5	18	32	21.8	16.0	18	32	24.5	3.3	23	4.7	18
24	埼玉県	1973	5	18	32	27.7	8.9	41	34	31.0	3.1	9	1.3	21
25	埼玉県	1975	5	18	28	28.5	6.7	32	32	28.0	2.7	18	3.1	24
26	京都府	1971	5	18	34	21.5	6.2	19	33	32.7	1.4	29	2.5	18
27	京都府	1971	5	18	34	24.9	16.9	21	33	35.0	1.0	41	0.9	28
28	京都府	1971	5	18	34	25.0	9.7	30	33	35.7	3.1	15	2.0	27
29	京都府	1971	5	18	34	26.6	2.5	37	33	36.8	1.7	22	2.0	27
30	京都府	1971	5	18	34	24.2	13.7	27	33	34.3	2.3	12	1.6	40
31	京都府	1971	5	18	33	22.4	6.5	50	33	28.9	2.5	19	0.5	45
32	京都府	1971	5	18	34	24.3	16.2	25	33	31.4	3.5	19	3.4	25
33	京都府	1971	5	18	33	26.3	10.0	23	33	27.1	1.4	15	2.8	42
34	京都府	1971	5	18	34	25.4	4.8	36	33	29.3	2.6	21	1.3	27

表 6.3.1-3 建築物から採取したコア供試体の測定時経過年数ならびに圧縮強度・中性化深さ・モルタル仕上げの塗厚の測定結果 (2/3)

建物 番号	所在地	竣工年 (西暦)	建物 階数	設計基準 強度 $F_c$ ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )	南面(建築物外周壁) 採取コア				北面(階段室手摺壁) 採取コア					
					測定時 経過 年数(年)	圧縮 強度 $\sigma_c$ ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )	雨がかり環境・外側		測定時 経過 年数(年)	圧縮 強度 $\sigma_c$ ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )	雨がかり環境・外側		雨がかり環境・内側	
							中性化 深さ $d_c$ (mm)	モルタル 塗厚 $D_m$ (mm)			中性化 深さ $d_c$ (mm)	モルタル 塗厚 $D_m$ (mm)	中性化 深さ $d_c$ (mm)	モルタル 塗厚 $D_m$ (mm)
35	京都府	1971	5	18	34	25.6	10.8	22	33	32.0	0.8	28	2.4	23
36	京都府	1971	5	18	34	17.5	21.9	30	33	31.9	5.2	17	3.9	26
37	京都府	1971	5	18	34	15.0	31.6	33	33	32.0	4.0	9	3.4	44
38	京都府	1971	5	18	34	21.0	3.3	37	33	30.0	3.0	35	11.8	25
39	京都府	1972	5	18	32	23.2	4.5	18	32	24.9	1.7	20	2.6	32
40	京都府	1972	5	18	34	22.3	8.1	21	32	26.1	2.7	39	4.0	34
41	京都府	1972	5	18	34	21.0	3.0	30	32	23.8	3.2	24	3.3	36
42	京都府	1972	5	18	34	21.8	0.4	34	32	31.3	3.3	16	3.6	41
43	京都府	1972	5	18	34	21.5	2.0	33	32	27.7	2.3	33	2.7	23
44	京都府	1972	5	18	32	24.1	3.9	36	32	31.3	1.7	30	3.0	25
45	京都府	1972	5	18	33	14.6	4.2	28	32	38.4	2.7	17	3.5	17
46	京都府	1972	5	18	34	22.6	10.2	34	32	30.9	3.5	34	3.0	20
47	京都府	1972	5	18	34	25.7	32.0	18	32	31.2	3.8	33	4.3	18
48	京都府	1972	5	18	34	26.8	15.0	22	32	31.4	2.5	37	3.9	14
49	京都府	1972	5	18	34	30.3	24.1	18	32	34.8	3.1	16	3.6	26
50	京都府	1973	5	18	30	21.7	13.2	19	34	22.2	2.3	17	3.6	22
51	京都府	1974	5	18	31	23.2	9.3	24	30	26.5	1.4	38	2.7	18
52	京都府	1974	5	18	29	22.9	16.2	22	30	29.7	0.1	30	0.1	18
53	京都府	1974	5	18	31	13.7	16.8	26	30	20.7	2.0	30	1.8	22
54	大阪府	1968	5	18	35	21.2	4.7	22	38	11.9	10.6	21	4.6	28
55	大阪府	1969	5	18	34	22.5	11.8	29	40	23.3	4.7	12	4.0	32
56	大阪府	1969	5	18	35	24.6	30.2	17	40	18.7	5.8	15	6.4	24
57	大阪府	1969	5	18	36	20.7	33.8	22	40	25.0	2.6	18	2.2	33
58	大阪府	1969	5	18	34	18.0	32.0	17	40	23.1	2.9	11	4.2	42
59	大阪府	1970	5	18	33	13.5	18.2	28	39	23.5	3.7	21	4.9	38
60	大阪府	1970	5	18	33	21.7	18.8	22	39	20.2	2.5	18	2.0	25
61	大阪府	1970	5	18	32	19.7	3.0	15	39	28.7	4.9	41	5.5	32
62	大阪府	1970	5	18	32	15.3	5.3	20	39	24.6	6.4	39	5.7	32
63	大阪府	1970	5	18	33	16.6	6.4	19	39	24.2	3.2	46	3.5	22
64	大阪府	1971	5	18	33	26.1	3.2	31	33	28.9	2.1	20	3.6	14
65	大阪府	1971	5	18	33	18.2	24.3	19	33	26.2	1.0	27	1.0	33
66	大阪府	1972	5	18	32	19.7	28.9	15	33	25.0	3.0	23	2.4	21
67	大阪府	1972	5	18	34	22.0	3.1	32	33	25.4	3.1	23	3.5	17
68	大阪府	1972	5	18	32	22.5	18.8	24	33	21.3	3.1	25	4.4	16

表 6.3.1-4 建築物から採取したコア供試体の測定時経過年数ならびに圧縮強度・中性化深さ・モルタル仕上げの塗厚の測定結果 (3/3)

建物 番号	所在地	竣工年 (西暦)	建物 階数	設計基準 強度 $F_c$ ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )	南面(建築物外周壁) 採取コア				北面(階段室手摺壁) 採取コア					
					測定時 経過 年数(年)	圧縮 強度 $\sigma_c$ ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )	雨がかり環境・外側		測定時 経過 年数(年)	圧縮 強度 $\sigma_c$ ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )	雨がかり環境・外側		雨がかり環境・内側	
							中性化 深さ $d_c$ (mm)	モルタル 塗厚 $D_m$ (mm)			中性化 深さ $d_c$ (mm)	モルタル 塗厚 $D_m$ (mm)	中性化 深さ $d_c$ (mm)	モルタル 塗厚 $D_m$ (mm)
69	大阪府	1972	5	18	34	24.1	16.8	20	33	24.4	1.9	21	0.8	23
70	大阪府	1972	5	18	34	25.8	15.7	27	31	21.4	5.5	38	5.9	18
71	大阪府	1972	5	18	34	16.4	13.1	36	31	18.1	4.7	33	22.0	21
72	大阪府	1972	5	18	34	21.5	8.9	29	31	22.4	3.5	15	4.2	33
73	大阪府	1972	5	18	34	18.4	22.7	14	31	23.3	1.9	40	18.2	17
74	大阪府	1972	5	18	34	21.0	2.5	42	31	26.9	2.0	19	1.7	25
75	大阪府	1972	5	18	34	21.8	28.0	31	31	22.8	1.5	29	3.7	19
76	大阪府	1972	5	18	34	16.3	13.5	28	31	20.8	2.6	22	4.4	27
77	大阪府	1972	5	18	32	28.1	21.3	24	33	23.9	2.7	23	4.6	37
78	大阪府	1972	5	18	32	23.6	9.6	24	33	33.4	2.3	52	3.9	16
79	大阪府	1972	5	18	32	17.6	12.9	20	32	20.8	4.3	42	5.5	6
80	大阪府	1972	5	18	33	17.9	17.1	16	32	20.5	2.1	42	4.2	14
81	大阪府	1972	5	18	33	18.6	24.8	19	32	16.2	3.1	40	2.5	20
82	大阪府	1972	5	18	31	21.5	14.7	16	32	23.1	2.4	51	3.8	22
83	大阪府	1972	5	18	32	21.8	8.6	29	32	27.1	1.3	41	3.5	13
84	大阪府	1972	5	18	33	21.9	20.9	15	32	18.7	3.4	30	4.1	21
85	大阪府	1972	5	18	33	17.9	21.1	16	32	19.4	2.8	41	3.1	24
86	大阪府	1974	5	18	30	22.2	16.8	27	35	24.0	1.7	28	1.7	35
87	大阪府	1975	5	18	28	42.5	0.6	29	30	29.0	2.2	35	1.5	13
88	大阪府	1971	5	18	35	19.8	9.2	20	34	20.9	2.7	18	3.5	25
89	大阪府	1971	5	18	35	21.5	8.2	19	34	17.9	3.5	45	4.6	20
90	大阪府	1971	5	18	35	21.4	19.8	22	34	21.6	4.9	33	3.7	20
91	大阪府	1971	5	18	35	27.1	0.7	23	34	19.0	2.2	32	1.9	25
92	大阪府	1971	5	18	31	21.6	16.8	25	33	19.6	11.8	18	6.8	28
93	大阪府	1972	5	18	33	15.6	28.4	11	32	19.6	4.6	23	4.0	20
94	大阪府	1972	5	18	33	14.7	31.5	15	32	18.5	3.8	27	3.1	39
95	大阪府	1972	5	18	32	14.2	30.6	19	32	19.5	4.4	24	3.7	25
96	大阪府	1972	5	18	33	17.3	19.9	19	32	24.9	0.3	34	3.7	20
97	大阪府	1972	5	18	32	14.9	5.6	25	32	22.0	4.4	28	4.5	31
98	大阪府	1972	5	18	33	18.2	13.5	23	32	19.4	5.3	9	3.9	25
99	兵庫県	1972	5	18	33	34.5	2.5	22	32	21.7	2.8	27	3.7	28
100	兵庫県	1974	5	18	31	34.7	12.5	19	35	31.6	2.6	30	2.8	22

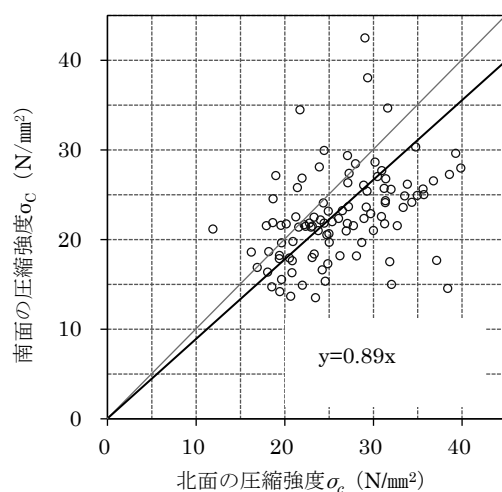


図 6.3.1-2 北面と南面の圧縮強度の関係

## (2) 中性化深さ

本調査対象建築物のコンクリートの設計基準強度  $18\text{N/mm}^2$  は、JASS5 の計画供用期間の級「短期」における耐久設計基準強度と同じである。また、中性化の試験時の経過年数は  $28\sim 46$  年でその多くが  $30$  年前半であり、「短期」の計画供用期間として定められているおおよそ  $30$  年とおおむね合致している。そこで、本調査の中性化深さ  $d_c$  と JASS5 において定められている計画供用期間「短期」の最小かぶり厚さを比較する。

中性化深さ  $d_c$  の度数分布を図 6.3.1-3 に示す。全てのコア供試体でコンクリートが中性化していた。

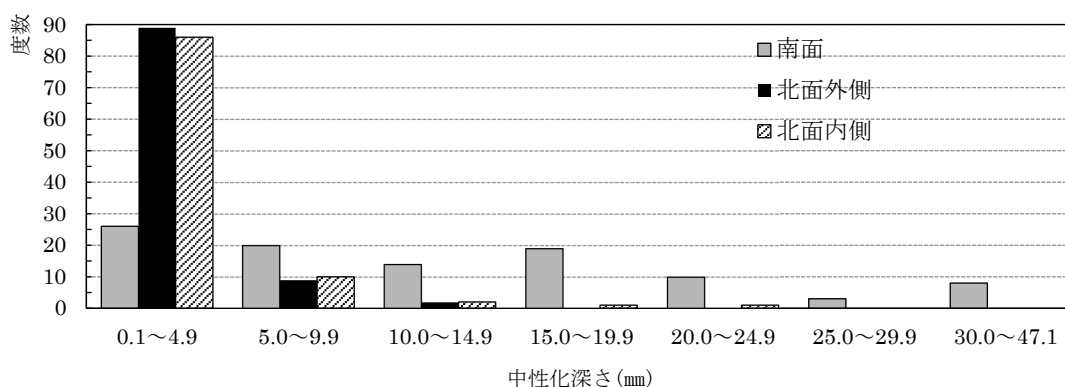


図 6.3.1-3 中性化深さの度数分布

表 6.3.1-2～4 によれば、中性化深さ  $d_c$  の平均値は南面が 13.1 mm であるのに対して、北面外側は 3.3 mm、北面内側は 4.0 mm であり、中性化は南面の方が進行している傾向にあった。北面の外側と内側の比較では、内側の方が若干進行していたが、その差は僅かである。南面の中性化深さ  $d_c$  は 0.4～47.1 mm の範囲に比較的幅広く分布しており、中性化深さ  $d_c$  が JASS5 の計画供用期間「短期」における非構造部材の最小かぶり厚さ 20 mm を超えるデータは 21%、耐力壁の最小かぶり厚さ 30 mm を超えるデータは 8% あった。北面の外側および内側の中性化深さ  $d_c$  は 0.1～22.0 mm の範囲に分布しており、5 mm 未満のデータが 90% 近くを占めた。耐力壁の最小かぶり厚さ 30 mm を超えるデータはなく、非構造部材の最小かぶり厚さ 20 mm を超えるデータは 0.5% に過ぎなかった。

### (3) 見かけの中性化速度係数

中性化深さに対して、中性化深さが経過期間の平方根に比例するいわゆる  $\sqrt{t}$  則に従った式(6.3.1-1)により中性化速度係数を求めた。

$$d_c = A' \sqrt{t} \quad (6.3.1-1)$$

ここで、 $d_c$  : モルタル仕上げの塗厚を含まない、コンクリート部分の中性化深さ (mm)

$A'$  : 見かけの中性化速度係数 (mm/ $\sqrt{\text{年}}$ )

$t$  : 経過期間 (年)、とする。

ここで、見かけの中性化速度係数  $A'$  は、コンクリートの中性化速度係数  $A_c$  に仕上げ材による中性化抑制効果を表す中性化率  $s$ <sup>6-5)</sup> を乗じた結果の係数に相当する。しかし、コンクリートの中性化深さに対して、モルタル仕上げの中性化期間とコンクリートの中性化期間を足しあわせた経過期間  $t$  を式(6.3.1-1)に適用して求めているため、コンクリートの中性化進行とその経過期間を適切に反映しておらず、任意の経過期間における中性化深さを精度良く予測することが求められる場合には適用できない。ここでは、類似の仕上げ材による他の調査報告例と比較するために算出したものである。このため、後述するコンクリートおよびモルタル仕上げの中性化速度係数と区別するために「見かけの中性化速度係数 ( $A'$ )」と呼ぶことにした。

本調査における結果、川西らの調査結果<sup>6-6)</sup>、中村らの調査結果<sup>6-7)</sup>および玉井らの調査結果<sup>6-8)</sup>を表 6.3.1-5 および図 6.3.1-4 に示す。本調査における見かけの中性化速度係数  $A'$  の平均値は、南面で 2.28 mm/ $\sqrt{\text{年}}$ 、北面外側で 0.57 mm/ $\sqrt{\text{年}}$ 、北面内側で 0.69 mm/ $\sqrt{\text{年}}$  であるのに対して、川西らの調査ではモルタル仕上げの上にリシン吹付けの平均値で 1.81 mm/ $\sqrt{\text{年}}$ 、中村らの調査では、屋

内外の区別がなくモルタル仕上げの上に何らかの化粧塗材が施された場合の平均値で 1.02 mm/√年，玉井らの調査では屋外におけるモルタル仕上げの平均値で 0.77 mm/√年であり，本調査結果における南面と北面の見かけの中性化速度係数  $A'$  の各平均値の間に，他の既往の調査報告における見かけの中性化速度係数  $A'$  の平均値が収まる結果であった。これは，既往の調査報告では方位は示されていないことから，各方位のデータが混在していると思われるが，本調査では方位を区別して見かけの中性化速度係数  $A'$  を求めたことで，中性化が進行しやすい南側の値は，既往のデータと比較して最大値を示し，中性化が抑制されやすい北側の値は逆に最小値を示したと考えられる。また，ばらつきが小さくなり，変動係数も低い結果が得られている。

表 6.3.1-5 各調査の見かけの中性化速度係数  $A'$  (mm/√年) の比較

	本調査結果			川西らの調査結果 <sup>6-6)</sup>	中村らの調査結果 <sup>6-7)</sup>	玉井らの調査結果 <sup>6-8)</sup>
	南面	北面外側	北面内側			
データ数	n=100	n=100	n=100	n=765	n=4121	n=15
平均値	2.28	0.57	0.69	1.81	1.02	0.77
標準偏差	1.62	0.31	0.52	1.63	1.35	0.94
変動係数	71.1%	54.4%	75.4%	90.1%	132%	122%

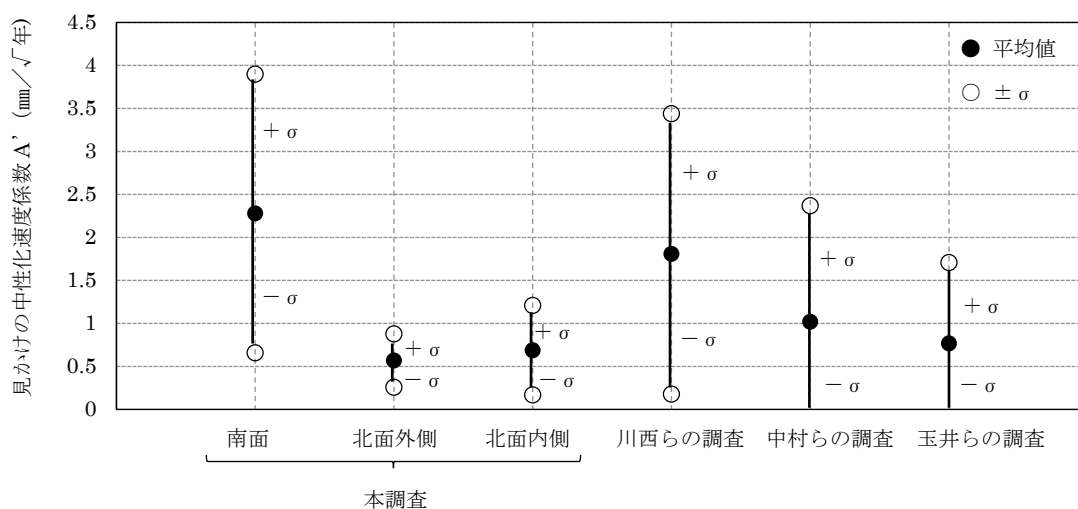


図 6.3.1-4 各調査の見かけの中性化速度係数  $A'$  (mm/√年) の比較

#### (4) モルタル仕上げの塗厚

モルタル仕上げの塗厚  $D_m$  の度数分布を図 6.3.1-5 に示す。表 6.3.1-2~4 に示すように、モルタル仕上げの塗厚  $D_m$  の平均値は、南面が 24.5 mm、北面外側が 25.4 mm、北面内側が 24.8 mm で、ほぼ同じであるが、変動係数は北面外側が他に比べると若干大きく、分布の幅が広い。北面の外側は、左官工事が仮設足場の上で行われるため、バルコニーや階段室踊り場が作業床になる南面や北面内側に比べると施工がしにくかったことが一因と考えられる。調査対象建築物の設計図書に示されたモルタル仕上げの塗厚  $D_m$  は 20 mm が多く、建設年近くの日本建築学会 JASS15<sup>6-9)</sup> においても壁面の塗厚は 25 mm が限度とされていたが、実際に施工された塗厚としてはそれより厚くなる傾向にあり、25 mm 以上のデータが 40% 以上を占めた。

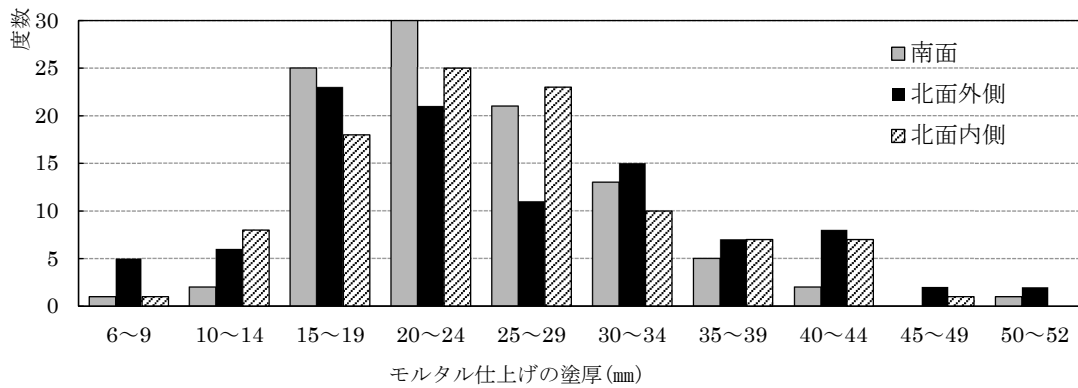


図 6.3.1-5 モルタル仕上げの塗厚の度数分布

### 6.3.2 見かけの中性化速度係数と圧縮強度およびモルタル仕上げの塗厚の関係

#### (1) 見かけの中性化速度係数と圧縮強度の関係

見かけの中性化速度係数  $A'$  と圧縮強度  $\sigma_c$  の関係について、前述の式(4.2.5-3)に示す関係式を適用し、最小二乗法により回帰式を求めた。南面を図 6.3.2-1 に、北面外側を図 6.3.2-2 に、北面内側を図 6.3.2-3 に示す。

一般的にコンクリートの中性化速度係数は圧縮強度  $\sigma_c$  と相関性が高いとされているが、モルタル仕上げが施されている場合の見かけの中性化速度係数  $A'$  については、モルタル自身が中性化すること、コンクリートに対する中性化抑制効果はその塗厚や品質によってばらつきがあると考えられることなどから、圧縮強度  $\sigma_c$  に対しての相関性は高くはないと考えられる。図 6.3.2-1 に示すように、中性化が進行しやすい南面では、ほぼ同一の圧縮強度  $\sigma_c$  でも見かけの中性化速度係数  $A'$  は 0~5.5 mm/√年まで広く分布しており、圧縮強度の大小に依存した中性化速度係数の分布の傾向は明確に表れていない。北面は、本調査ではコンクリートの中性化がほとんど進行していなかったため、図 6.3.2-2 および図 6.3.2-3 に示すように、見かけの中性化速度係数  $A'$  は圧縮強度  $\sigma_c$  の大小に関わらずほぼ 1 mm/√年未満と小さい値であり、圧縮強度  $\sigma_c$  の増加に対する見かけの中性化速度係数  $A'$  の減少の勾配は極めて緩やかであった。また、北面の外側と内側では特に傾向の違いは見られなかった。

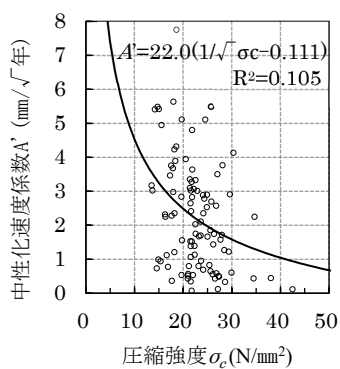


図 6.3.2-1 見かけの中性化速度係数と圧縮強度の関係 (南面)

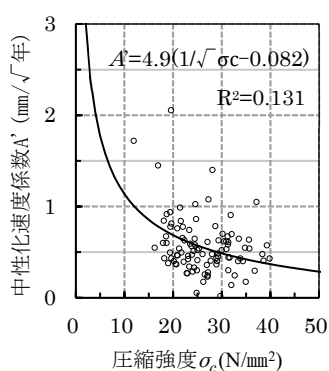


図 6.3.2-2 見かけの中性化速度係数と圧縮強度の関係 (北面外側)

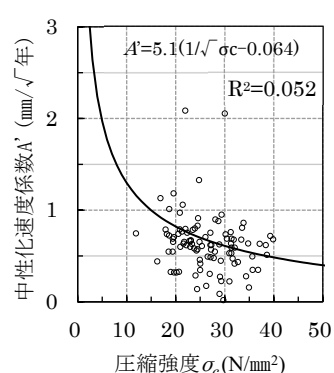


図 6.3.2-3 見かけの中性化速度係数と圧縮強度の関係 (北面内側)



(2) 見かけの中性化速度係数とモルタル仕上げの塗厚の関係

厚さが大きな仕上げ材を有するコンクリートの中性化深さは、理論的<sup>例えば、6-10</sup>には、仕上げ材の全厚に比例して減少する。そこで、見かけの中性化速度係数  $A'$  はモルタル仕上げの塗厚  $D_m$  に比例して減少するという線形の関係にあるとみなした式(6.3.2-1)で表すことにし、最小二乗法により求めた回帰式を図 6.3.2-4～6.3.2-6 に示す。

$$A' = -a_1(D_m - b_1) \tag{6.3.2-1}$$

ここで、 $a_2$ ,  $b_2$  : 定数, とする。

見かけの中性化速度係数  $A'$  とモルタル仕上げの塗厚  $D_m$  の関係について、南面では、図 6.3.2-4 に示すように、モルタル仕上げの塗厚  $D_m$  が増加するほど見かけの中性化速度係数  $A'$  が減少する傾向が比較的表れており、圧縮強度  $\sigma_c$  との関係に比べると相関性は高い結果である。モルタル仕上げの塗厚  $D_m$  が 10～20 mm では見かけの中性化速度係数  $A'$  の多くは 3 mm/√年以上であるが、モルタル仕上げの塗厚  $D_m$  が 20～30 mm ではばらつきが大きいもの見かけの中性化速度係数  $A'$  はほぼ 4 mm/√年以下になり、データ数は少ないがモルタル仕上げの塗厚  $D_m$  が 30 mm 以上では見かけの中性化速度係数  $A'$  は 2 mm/√年以下になっている。一方、図 6.3.2-5 および図 6.3.2-6 に示すように、北面の外側および内側では全体的に見かけの中性化速度係数  $A'$  が小さいため、モルタル仕上げの塗厚  $D_m$  の増加による違いは南面ほど明確ではなく、その厚さに関わらず中性化抑制効果はほぼ一定に近いが、モルタル仕上げの塗厚  $D_m$  が 30 mm 以上ではばらつきによって見かけの中性化速度係数も  $A'$  が 1 mm/√年以上になっているデータはない。

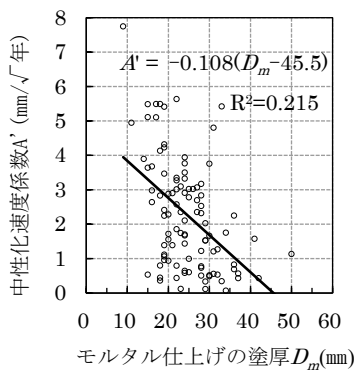


図 6.3.2-4 見かけの中性化速度係数とモルタルの塗厚の関係 (南面)

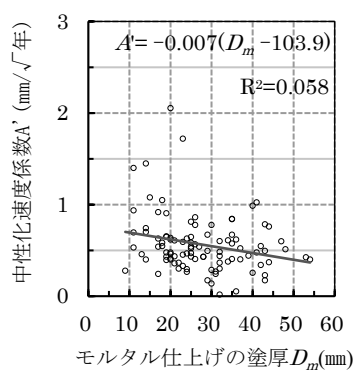


図 6.3.2-5 見かけの中性化速度係数とモルタルの塗厚の関係 (北面外側)

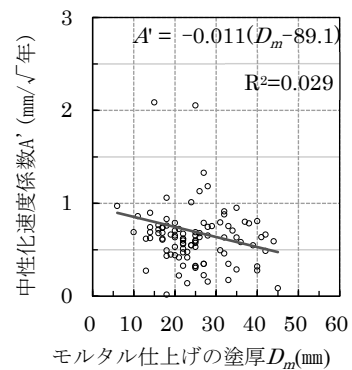


図 6.3.2-6 見かけの中性化速度係数とモルタルの塗厚の関係 (北面内側)

### 6.3.3 中性化に及ぼすモルタル仕上げの影響

#### (1) モルタル仕上げの中性化抵抗および中性化速度係数

調査結果の実測値であるモルタル仕上げの塗厚  $D_m$  と式(6.2.4-6)から算出したモルタル仕上げの中性化抵抗  $R$  およびモルタル仕上げの中性化速度係数  $A_m$  の関係について、南面を図 6.3.3-1(a)に、北面外側を図 6.3.3-1(b)に、北面内側を図 6.3.3-1(c)に示す。また、モルタル仕上げの中性化抵抗  $R$  およびモルタル仕上げの中性化速度係数  $A_m$  の平均値、標準偏差および変動係数を表 6.3.3-1 に示す。ただし、南面の 1 データは、 $R$  および  $A_m$  が計算上、負の値になったため除外した。

なお、ここでの分析上の仮定として、モルタル仕上げの上にはリシン吹付が施されているが、リシン吹付の中性化抑制効果は低く<sup>6-11)</sup>、モルタル仕上げの効果が支配的であると見なして、リシン吹付の効果は無視することにした。また、式(6.2.4-2)の  $A_c$  は打放しコンクリートの中性化速度係数に相当し、ここでは、前述の式(4.2.5-3)の回帰式で、打放しコンクリートの南面と北面の定数として表 4.3.1-4 の(d)および(e)に示す調査結果を適用した式(6.3.3-1)によることとした。式(6.3.3-1)の方位別の定数を用いて、表 6.3.1-2~6.3.1-4 に示すコア供試体の圧縮強度  $\sigma_c$  ごとにコンクリートの中性化速度係数  $A_c$  を算出した。

$$A_c = a_2(1/\sqrt{\sigma_c} - b_2) \quad (6.3.3-1)$$

ここで、 $a_2$  : 回帰式の定数で、南面は 39.6、北面は 104

$b_2$  : 回帰式の定数で、南面は 0.046、北面は 0.142、とする。

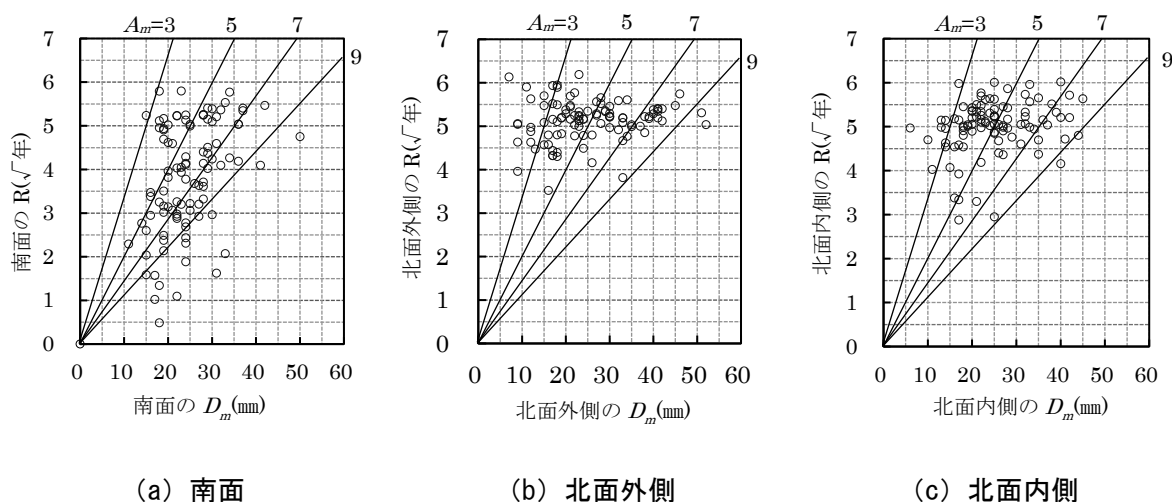


図 6.3.3-1 モルタル仕上げの塗厚・中性化抵抗・中性化速度係数の関係

表 6.3.3-1 モルタル仕上げの中性化抵抗・中性化速度係数の平均値・標準偏差・変動係数

試験・測定項目		南面	北面・外側	北面・内側
中性化抵抗 $R$ ( $\sqrt{\text{年}}$ )	データ数	n=99	n=100	n=100
	平均値	3.83	5.13	5.00
	標準偏差	1.30	0.47	0.61
	変動係数	34.0%	9.2%	12.1%
モルタルの中性化速度係数 $A_m$ (mm/ $\sqrt{\text{年}}$ )	データ数	n=99	n=100	n=100
	平均値	7.69	4.95	4.98
	標準偏差	5.45	1.94	1.64
	変動係数	70.9%	39.2%	33.0%

モルタル仕上げの中性化抵抗  $R$  の平均値は、南面が  $3.83\sqrt{\text{年}}$  であるのに対して、北面は中性化抑制効果が高いことが示される結果になっており、外側で  $5.13\sqrt{\text{年}}$ 、内側で  $5.00\sqrt{\text{年}}$  であった。北面の外側と内側に顕著な違いはなかった。南面の中性化抵抗  $R$  は図 6.3.3-1(a) に示すように、モルタル仕上げの塗厚  $D_m$  が  $20\text{ mm}$  以上において  $5.5\sqrt{\text{年}}$  前後を効果の上限としてほぼ横ばい傾向にあり、また、モルタル仕上げの塗厚  $D_m$  が小さくなるほど中性化抵抗  $R$  も小さくなる比例した関係が表れている。一方、北面の中性化抵抗  $R$  については、変動係数が  $10\%$  前後と小さく、図 6.3.3-1(b) および図 6.3.3-1(c) に示すように、 $5 \pm 0.5\sqrt{\text{年}}$  の範囲にデータが集中しており、データ数の  $70\%$  程度が含まれる。これは北面の中性化深さ  $d_c$  のデータの  $90\%$  近くが  $5\text{ mm}$  未満と小さく、中性化抵抗  $R$  として違いが表れる程度に中性化が進行したデータが少ないためと考えられる。中性化抵抗  $R$  が小さいデータは、モルタル仕上げの塗厚  $D_m$  が  $20\text{ mm}$  を下回る場合に散見される。南面のモルタル仕上げの中性化速度係数  $A_m$  については、変動係数が  $70.9\%$  と大きく、 $10\text{ mm}/\sqrt{\text{年}}$  以上の一部のデータによる影響もあり平均値が  $7.69\text{ mm}/\sqrt{\text{年}}$  と高くなっている。北面のモルタル仕上げの中性化速度係数  $A_m$  は外側で  $4.95\text{ mm}/\sqrt{\text{年}}$ 、内側で  $4.98\text{ mm}/\sqrt{\text{年}}$  である。北面の中性化抵抗  $R$  はモルタル仕上げの塗厚  $D_m$  の大小に対する値の変化が小さいために、モルタル仕上げの塗厚  $D_m$  の分布とモルタル仕上げの中性化速度係数  $A_m$  の分布の傾向はそのまま対応することになり、モルタル仕上げの塗厚  $D_m$  とモルタル仕上げの中性化速度係数  $A_m$  の変動係数はほぼ同じである。

## (2) 既往の促進中性化試験結果との比較

なお、使用材料や施工条件が同一で、モルタル仕上げの塗厚  $D_m$  の違いによるモルタル仕上げの中性化抑制効果への影響が検証された既往の報告としては、例は少ないが促進中性化試験に限定される。普通ポルトランドセメントを使用し、水結合材比 40%、結合材：細骨材=1:2.5（質量比）、結合材に対するポリマー量が 3%（容積比）のモルタル仕上げを塗厚  $D_m=5, 10, 20, 30$  mm で施したコンクリートと仕上げなし ( $D_m=0$  mm) のコンクリートにおける 26 週の促進中性化試験の結果<sup>6-12)</sup>を表 6.3.3-2 に引用する。この結果は、CO<sub>2</sub>濃度が 5%の試験条件における値であるので、自然環境下の屋外の CO<sub>2</sub>濃度を 0.05%と仮定したときの中性化深さに変換し、式 (6.2.4-6) に代入し、あわせて単位を√年 (1年=52週) にして、促進中性化試験結果に基づいた中性化抵抗  $R$  および中性化速度係数  $A_m$  を求めた。なお、CO<sub>2</sub>濃度の変換係数は、ここでは平方根に比例する<sup>6-13)</sup>と仮定して、 $\sqrt{0.05/5} = 0.1$ とした。結果を表 6.3.3-3 に示す。中性化抵抗  $R$  は 1.92~5.72√年で、モルタル仕上げの塗厚  $D_m$  が 20 mm まではモルタル仕上げの塗厚  $D_m$  が大きくなるほど中性化抵抗  $R$  も大きくなるが、モルタル仕上げの塗厚  $D_m$  が 20 mm 以上で中性化抵抗  $R$  が 5.60~5.72√年で頭打ちになった。実建築物の調査結果においても中性化抵抗  $R$  は 5.5~6√年で頭打ちになっており、ほぼ同様の傾向であった。モルタル仕上げの中性化速度係数  $A_m$  は 2.60~5.36 mm/√年で、実建築物の調査結果の範囲内であるが、実建築物はばらつきが大きく促進中性化試験結果より大きい値を示すデータが多い。

表 6.3.3-2 促進中性化試験 (26 週) によるコンクリートの中性化深さ<sup>6-12)</sup>

モルタル仕上げの塗厚 (mm)	0	5	10	20	30
コンクリートの中性化深さ (mm)	28.3	20.6	17.5	5.4	5.9

表 6.3.3-3 促進中性化試験 (26 週) の結果<sup>6-12)</sup> から求めたモルタル仕上げの  
中性化抵抗および中性化速度係数

モルタル仕上げの塗厚 (mm)	5	10	20	30
モルタルの中性化抵抗 (√年)	1.92	2.70	5.72	5.60
モルタルの中性化速度係数 (mm/√年)	2.60	3.71	3.50	5.36

### 6.3.4 中性化に及ぼす方位および温湿度の影響

#### (1) 各方位の中性化比率

建築物ごとに同一建築物での南面、北面外側および北面内側の中性化速度係数  $A_m$  から求めた、南面／北面外側の中性化比率、南面／北面内側の中性化比率、北面内側／北面外側の中性化比率における各々の平均値、標準偏差および変動係数を表 6.3.4-1 に示す。モルタル仕上げにおける南面／北面外側および南面／北面内側の中性化比率の平均値は約 1.62 であり、既往の調査<sup>6-14)</sup>で報告されている打放しコンクリートの場合における南面／北面の中性化比率である 1.45 (文献<sup>6-14)</sup>上の表記は、北面／南面の数値として 0.69) と概ね近い値であった。一方、モルタル仕上げにおける北面内側／北面外側の中性化比率の平均値は 1.07 であり、同じく既往の調査<sup>6-14)</sup>で報告されている打放しコンクリートの場合における「雨がかからない／雨がかかる」の中性化比率である 1.6 と比べると小さい値であった。これは、階段室の軒先にある手摺り壁の内側は、上部から雨滴が流れ落ちることがあるために、結果として外側との中性化進行に大きな差が表れなかったためと考えられる。

表 6.3.4-1 建築物ごとの各方位のモルタル仕上げの中性化比率の平均値・標準偏差・変動係数

	南面／北面外側	南面／北面内側	北面内側／北面外側
データ数	n=99	n=99	n=100
平均値	1.62	1.63	1.07
標準偏差	1.19	1.12	0.55
変動係数	73.5%	68.7%	51.4%

#### (2) 温湿度による影響係数を用いた中性化比率に対する評価

温度差および相対湿度差による中性化進行の差異が実建築物での方位による中性化進行の差異にどの程度の影響を与えているかの推定を行うために、実建築物のモルタル仕上げ表面において想定される南面および北面の温度と相対湿度を前述の式(4.2.5-4)および式(4.2.5-5)に適用して求めた影響係数の比率と、表 6.3.4-1 に示す実測したコンクリートの中性化深さ  $d_c$  から求めた南面／北面のモルタル仕上げの中性化速度係数  $A_m$  の中性化比率を比較する。

前述の表 4.2.4-1 の建築物における、2016 年 2 月 3 日から 2017 年 1 月 27 日までの計測記録

から求めた 1 階外壁各方位における日平均温度および日平均相対湿度の月別の平均値および全体の平均値を表 6.3.4-2 に示す。また、南面と北面について、日平均温度の推移を比較したグラフを図 6.3.4-1 に、日平均湿度の推移を比較したグラフを図 6.3.4-2 に示す。また、当該建築物から約 6km 離れた位置にある越谷気象観測所（埼玉県越谷市）で同期間に観測された日平均気温の月別平均値、降水量および日照時間の月別合計値<sup>6-15)</sup>ならびに観測所では相対湿度は観測されていないために当該建築物から約 17km 離れた位置にある東京気象台（東京都千代田区）で観測された日平均相対湿度の月別平均値<sup>6-15)</sup>を表 6.3.4-3 に示す。

方位別の日平均温度の平均値が最も高いのは南面で 18.8℃、最も低いのは北面で 16.4℃、その差は 2.4℃である。方位別の日平均相対湿度の平均値が最も高いのは北面で 68.8%、最も低いのは南面で 62.0%、その差は 6.8%である。東面と西面における日平均温度および日平均相対湿度の各平均値は、南面と北面の間である。なお、東面の 9 月、10 月にデータの欠測があったが、それ以前のデータから判断して前述した傾向は変わらないと考えられる。南面と北面における温度の差異は、温度が低い冬期に相対的に大きくなった。また、南面と北面における相対湿度の差は、湿度が低い冬期ならびに降水量が多かった 8 月、9 月および 11 月に相対的に大きくなった。晴天になれば日射を受けてある程度乾燥する南面などに比べて、日射を受けない北面は降雨後も比較的相対湿度が高い状態で推移する傾向にあることが伺える。

表 6.3.4-2 1 階外壁各方位の日平均温度および日平均相対湿度の月別平均値

測定項目	部 位	方 位	月別の平均値（2016 年 2 月～2017 年 1 月）											全体平均	
			2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月		1 月
温度 (℃)	外 壁	東	8.6	11.2	16.3	20.7	22.8	25.6	27.5	欠測	欠測	12.4	9.6	6.1	※
		西	8.5	11.4	16.6	21.9	23.9	26.8	28.7	25.6	19.9	11.9	8.4	5.3	17.6
		南	10.6	12.0	16.7	21.3	23.5	26.6	28.8	25.9	21.2	14.5	12.6	10.3	18.8
		北	6.6	9.7	15.6	20.7	22.9	25.7	27.3	24.5	18.6	10.9	7.6	4.3	16.4
相対湿度 (%)	外 壁	東	63.1	62.4	64.6	64.8	72.7	76.0	73.0	欠測	欠測	70.7	63.5	58.5	※
		西	58.5	60.3	63.5	61.3	67.4	72.6	70.8	77.3	67.1	67.0	58.0	54.0	65.0
		南	55.4	58.6	63.0	63.2	69.2	72.2	67.8	74.7	62.6	60.7	51.2	42.8	62.0
		北	64.0	64.9	65.7	63.8	70.9	75.6	76.4	83.5	69.3	71.1	61.9	57.3	68.8

※東面の 9 月、10 月の温度・相対湿度に欠測があったため全体平均値は示していない

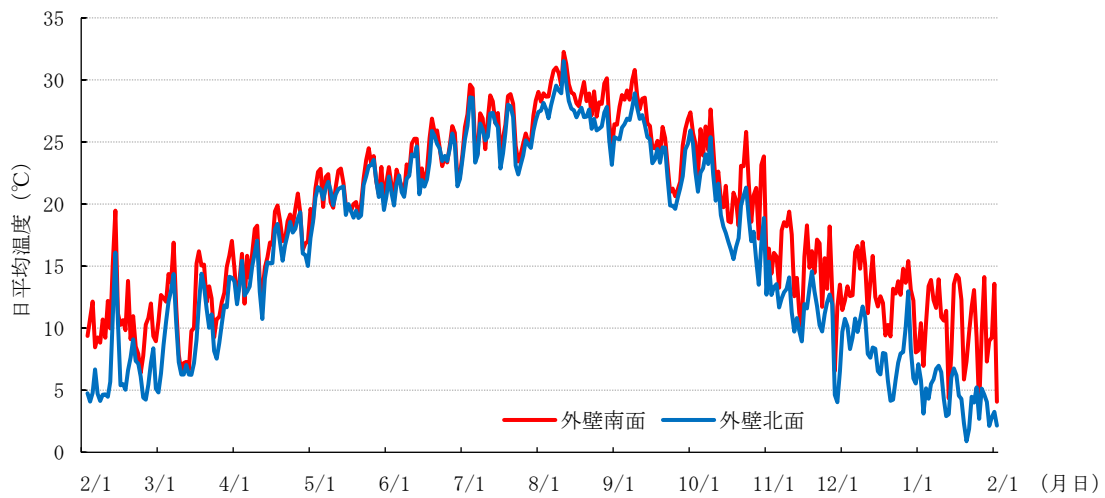


図 6.3.4-1 1階外壁の南面および北面における日平均温度の推移

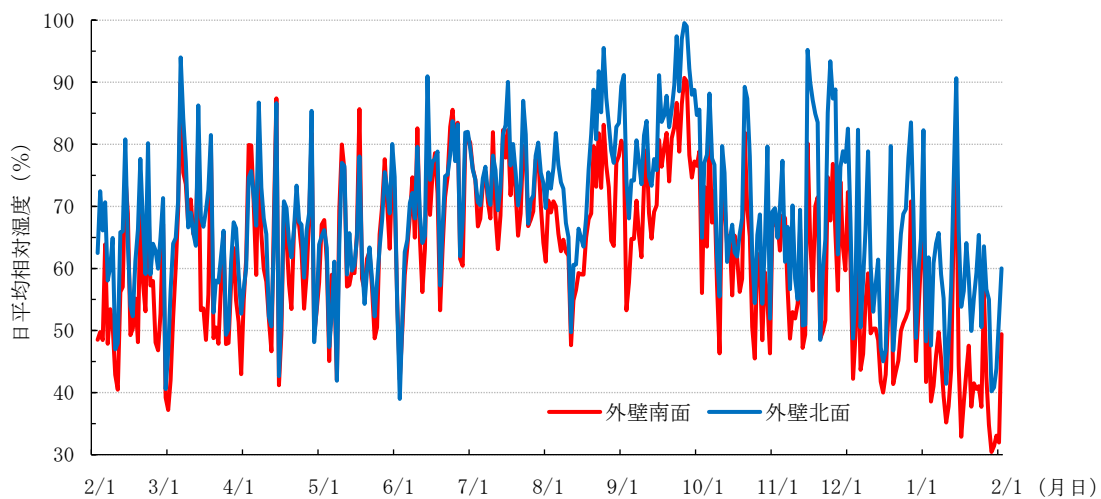


図 6.3.4-2 1階外壁の南面および北面における日平均相対湿度の推移

表 6.3.4-3 最近点の観測所・気象台で観測された気温、相対湿度、降水量および日照時間の月別合計値<sup>6-15)</sup>

	月別の合計値 (2016年2月～2017年1月)												月 平均
	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	
気温(°C)	6.1	9.3	14.8	19.9	22.5	25.3	27.0	24.2	17.9	10.3	7.0	4.2	15.7
相対湿度 (%)	56	61	67	66	75	80	78	86	72	71	59	53	69
降水量 (mm)	41	73	94	71	104	83	309	237	53	111	74	22	106
日照時間 (h)	166	158	149	197	147	134	170	90	135	132	208	236	161

次に外壁の方位による温度差および相対湿度差によって、実環境における実建築物の中性化進行にどの程度の影響を与えているかの推定を行うために、表 6.3.4-2 に示す 1 階外壁の南面と北面の温度および相対湿度を前述の式(4.2.5-4)および式(4.2.5-5)に代入して求めた影響係数の比率と、表 6.3.4-1 に示すような実測した中性化深さ  $d_N$  から求めた南面/北面の中性化速度係数  $A_N$  による中性化比率を比較する。

式(4.2.5-4)による温度の影響係数  $\beta_1$  および式(4.2.5-5)による相対湿度の影響係数  $\beta_2$  における南面/北面の各比率および  $\beta_1$  と  $\beta_2$  を掛け合わせた ( $\beta_1 \times \beta_2$ ) 結果における南面/北面の比率を図 6.3.4-3 に示す。

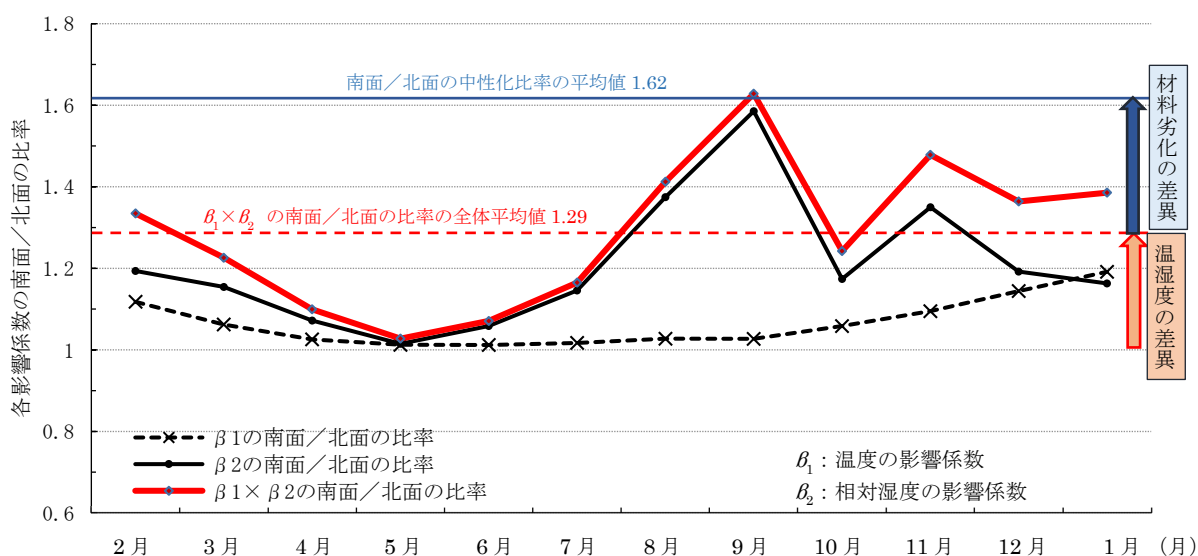


図 6.3.4-3 計測した温度・相対湿度に基づく中性化への影響係数の南面/北面の比率

温度や相対湿度の変化を月平均で捉えた場合に、 $\beta_1$ の南北の比率は 1.01~1.19 で平均値は 1.07,  $\beta_2$ の南北の比率は 1.01~1.59 で平均値は 1.21,  $\beta_1 \times \beta_2$ の南北の比率は 1.03~1.63 で平均値は 1.29 であった。 $\beta_1 \times \beta_2$ の南北の比率の推移は、ほぼ  $\beta_2$ の比率によるものであり、南面と北面における中性化深さの差異に対する要因として、温度差より相対湿度差の影響の方が大きいことが分かる。一方、表 6.3.4-1 に示すように南面と北面におけるモルタル仕上げの中性化比率の平均値は 1.62 であり、温度と相対湿度による影響係数  $\beta_1 \times \beta_2$ の南北の比率の平均値 1.29 よりはやや大きめであった。中性化比率が影響係数の比率に比べてやや大きい結果となった理由として、温度・湿度の差異が中性化速度に及ぼしている影響に加えて、南面と北面によるモルタル施工時の養生



環境の違いや日射を受けない北面に比べて南面に施されたモルタル仕上げは温度伸縮などによりひび割れなどが生じやすいなどの、方位別の温度・湿度の差異に起因した仕上げ材の材料的な劣化状態の違いが影響を及ぼした可能性も考えられる。なお、基礎立上り部の屋外と床下の比較で同様の検討を行った第4章の図4.2.3-7に示す結果と比べると、基礎立上り部における検討の方が中性化比率に対する影響係数の推定精度が高いのは、中性化比率を基礎立上り部で採取した同一コアの屋外側と床下側の中性化深さに基づいて求めているため、コンクリートの性能・品質の違いが少ないためと思われる。

しかし、本項で行った外壁による検討の場合でも、冬期や降水量が多い時期など、南面と北面における相対湿度の差が広がる条件の場合には、温度と相対湿度による影響係数 $b_1 \times b_2$ の南北の比率の平均値は1.4~1.6程度になり、南面と北面におけるモルタル仕上げの中性化比率の平均値1.62とおおむね近い値を示す。

以上、建築物の方位による環境条件の違いを外壁表面近傍で1年間に渡って実測した温度および相対湿度を指標とした影響係数として定量的に表し、モルタル仕上げが施されたコンクリート外壁で実測した中性化深さに基づいて算出した方位別の中性化比率と比較した結果を示した。

## 6.4 まとめ

本章では、モルタル仕上げが施された実建築物 100 棟の南面および北面から採取したコア 200 本の調査に基づいて、方位によるコンクリートの中性化深さの違いの実態やモルタル仕上げによるコンクリートの中性化抑制効果を定量的に示した。また、方位による環境条件の相違を躯体表層近傍で実測した温度・相対湿度により指標化し、中性化の差異と関連づけて考察した。

結論を以下に示す。

- (1) モルタル仕上げの中性化抵抗の平均値は、南面で  $3.83\sqrt{\text{年}}$ 、北面の外側で  $5.13\sqrt{\text{年}}$ 、北面の内側で  $5.00\sqrt{\text{年}}$  であり、 $5.5\sim 6\sqrt{\text{年}}$  で頭打ちになる傾向にあった。モルタル仕上げの中性化速度係数の平均値は、南面で  $7.69\text{ mm}/\sqrt{\text{年}}$ 、北面の外側で  $4.95\text{ mm}/\sqrt{\text{年}}$ 、北面の内側で  $4.98\text{ mm}/\sqrt{\text{年}}$  であった。北面の屋外で露出している外側と内側では中性化の傾向に差異は見られなかったが、南面と北面では明確な差異が見られた。
- (2) 同一建築物における南面と北面のモルタル仕上げの中性化速度係数の比率の平均値は 1.62 程度であった。実建築物の各方位の外壁表面近傍で 1 年間、温度および相対湿度を実測し、それから求めた中性化に関する影響係数における南面と北面の比率は、南面と北面の相対湿度の差が大きくなる時期では 1.4~1.6 程度になり、平均では 1.29 であることを示した。
- (3) 方位による環境条件の違いを温度および相対湿度を指標として表すことで、モルタル仕上げが施された実建築物のコンクリートの中性化における方位別の差異を定量化可能であることを明らかにした。また、中性化進行の違いに与える影響には、温度・湿度そのものによる差異以外に、その温度・湿度の差異に起因した仕上げ材の材料的な劣化状態の差異がある可能性を示した。

## 参考文献

- 6-1) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計施工指針・同解説，2016
- 6-2) 石川廣三ほか 1 名：壁面に衝突する雨滴の傾斜角の推定，外壁面におよぼす雨がかり負荷の評価に関する基礎的研究，日本建築学会構造系論文報告集，第 611 号，pp.13-20，2007.1
- 6-3) 李榮蘭ほか 1 名：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報告集，第 649 号，pp.499-504，2010.3
- 6-4) 馬場明生ほか 1 名：各種の表層面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，Vol.9，No.1，pp.333-338，1987
- 6-5) (財)国土開発技術研究センター建築物耐久性向上技術普及委員会編：鉄筋コンクリート造建築物の耐久性向上技術，pp.281-282，技報堂出版，1986
- 6-6) 川西泰一郎ほか 2 名：実建物調査に基づくコンクリートの中性化進行に関する分析，日本建築学会構造系論文集，第 608 号，pp.9-14，2006.10
- 6-7) 中村隆治ほか 2 名：既存鉄筋コンクリート造建築物のコンクリート材料調査における圧縮強度と中性化深さの統計，その 2，日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1，pp.551-552，2011.8
- 6-8) 玉井孝幸ほか 4 名：1953 年から 1985 に建設された建物の構造体コンクリートの中性化の実態，日本建築学会技術報告集，vol.13，No.25，pp.1-6，2007.6
- 6-9) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 15 左官工事，1975
- 6-10) 福島敏夫ほか 1 名：高分子仕上塗材がコンクリートの中性化進行に及ぼす影響の定量的評価，日本建築学会構造系論文報告集，第 434 号，pp.1-12，1992.4
- 6-11) 高山勝行ほか 7 名：躯体コンクリートの中性化抑制効果に寄与する各種仕上げ材の評価，その 3，日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1，pp.1127-1128，2007.8
- 6-12) 渡邊悟士ほか 7 名：仕上材によるコンクリートの中性化抑制効果に関する基礎的検討，その 7，日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1，pp.397-398，2013.8
- 6-13) 阿部道彦ほか 5 名：コンクリートの促進中性化試験法の評価に関する研究，日本建築学会構造系論文報告集，第 409 号，pp.1-10，1990.3
- 6-14) 和泉意登志ほか 1 名：経年建築物におけるコンクリートの中性化と鉄筋の腐食，日本建築学会構造系論文報告集，第 406 号，pp.1-12，1989.12
- 6-15) 気象庁ウェブページ：<http://www.jma.go.jp/jma/index.html>

## 第7章 実建築物の合理的な劣化評価手法の提案

### 7.1 はじめに

第7章では、第4章から第6章で提案した予測・評価手法を包括的に体系化した建築物の劣化評価手法を提案し、その適用性および妥当性を検証した。すなわち、ケーススタディとして第3章で調査対象とした特定の実建築物の打放しコンクリートおよびモルタル仕上げが施されたコンクリートの各方位面の中性化深さを対象に実測調査および予測計算を行い、それらを比較検討した。

### 7.2 実建築物の合理的な劣化評価手法の提案

#### 7.2.1 概要

本章で提案する劣化評価手法は、第3章から第6章における知見を包括的に体系化し、ある環境条件で実測されたコンクリートの中性化深さから他の環境条件における仕上げ材の中性化抑制効果が考慮された中性化深さを予測・評価するものである。なお、中性化が鉄筋位置まで進行した以降の劣化事象である鉄筋腐食の可能性に関する評価については、本論文では第3章で示した1件の個別詳細調査に基づく鉄筋腐食の実態把握にとどまっているため、参考として考え方のみを提示した。この部分については今後の課題である。

ここで用いた各章で得られた具体の知見は以下のとおりである。

ある環境条件で実測されたコンクリートの中性化深さから他の環境条件におけるコンクリートの中性化深さを予測するにあたっては、第4章で示した実建築物で環境条件が局所的に異なる部位間における中性化進行の差異について、温度および相対湿度を指標にして中性化進行の影響係数として評価する手法、第5章で示した促進試験環境と実環境における実建築物との中性化の対応を中性化速度係数比として算出した手法によった。次に、仕上げ材の中性化抑制効果を考慮するにあたっては、第6章で示した実建築物の調査結果から求めたモルタル仕上げ部分の中性化速度係数の平均値とモルタル仕上げの塗厚から算出した中性化抵抗を用いた。最後に、鉄筋腐食の可能性の評価について、参考として、第3章で示した鉄筋腐食状況と部位、中性化深さ、かぶり厚さおよびコンクリートの含水率との関係を用いた。

## 7.2.2 劣化評価手法のフローと内容

提案する劣化評価手法のフローを図 7.2.2-1 に示し、各ステップの内容を以下に示す。

なお、スタートは、促進中性化試験による中性化深さの結果に基づいて検討する場合（図中①）と、実建築物で採取したコアで測定した中性化深さの結果に基づいて検討する場合（図中②）の 2 パターンを示した。前者は主に新築する建築物を想定し、後者はある程度の長期間経年した既存建築物を想定している。特に実務で行われる実建築物の劣化調査では、限定的な調査位置・数量によって得られた中性化データに基づいて建築物全体を評価せざるを得ない。これをより適切にかつ合理的に行うことを主な目的としている。

### （1）促進中性化試験から床下環境の打放しコンクリートの中性化速度係数を予測

第 5 章で得られた知見に基づき、まず、使用するコンクリートの促進中性化試験で測定した中性化深さ（図 7.2.2-1 中の①）から実建築物の床下環境の打放しコンクリートに相当する中性化速度係数を式（7.2.2-1）により予測する（図 7.2.2-1 中の②）。なお、促進中性化試験による中性化速度係数の算出は、一般的な $\sqrt{t}$ 則によるものとする。

$$A_C = R \cdot A_A \quad (7.2.2-1)$$

ここで、 $A_C$ ：実建築物の床下環境に相当する中性化速度係数（ $\text{mm}/\sqrt{\text{年}}$ ）

$R$ ：中性化速度係数比で、コンクリートの圧縮強度に応じた下表の数値とする

圧縮強度 ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )	20～25	25～30	30～45	45～50
中性化速度係数比 $R$	0.10	0.09	0.08	0.07

$A_A$ ：促進中性化試験による中性化速度係数（ $\text{mm}/\sqrt{\text{年}}$ ）で、 $A_A = d_A / \sqrt{t_A}$ とする

$d_A$ ：促進中性化深さ（ $\text{mm}$ ）

$t_A$ ：促進中性化期間（年）、とする。

### （2）実建築物の床下環境で採取したコアから打放しコンクリートの中性化速度係数を算出

実建築物の基礎立上り部でコアを採取し、床下側の打放しコンクリート面で測定した中性化深さ（図 7.2.2-1 中の①'）から、一般的な $\sqrt{t}$ 則により中性化速度係数を算出する（図 7.2.2-1 中の②'）。

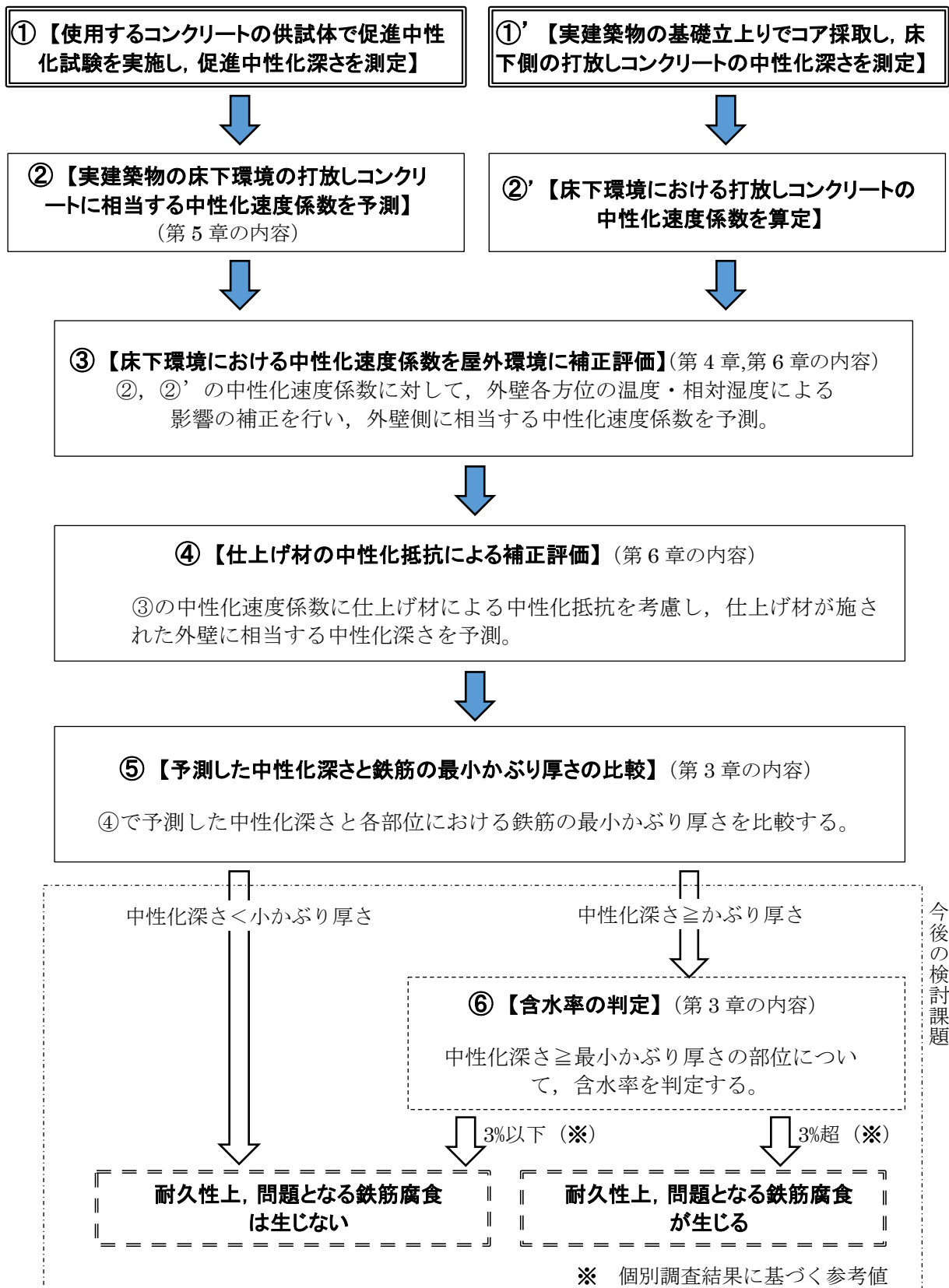


図 7.2.2-1 劣化にかかる調査・試験の合理化に向けた実建築物の劣化評価手法のフロー

ここで、基礎立上り部床下側を建築物における中性化深さ測定の代表位置とし、その実測中性化深さを他の部位での中性化深さを予測するうえでの計算上の基準値として扱う。これは、一般的に当該箇所は打放し仕上げであり、コンクリート躯体のみの中性化抵抗が求められること、また、床下は比較的安定した温湿度状態にあり、日射や降雨などの外部環境や人間生活の影響も受けなため、選定した調査位置の違いによる局所的な中性化深さのばらつきが少ない部位と考えられるからである。

さらには、コア採取作業を建築物の外周部地盤面で行えるために、実務で行われる調査において重視される居住環境への配慮もされることになり、作業上のメリットも大きいことも考慮した。

### (3) 床下環境における中性化速度係数を屋外環境に補正評価

第4章および第6章で得られた知見に基づき、床下環境における中性化速度係数に、床下および屋外環境の温度・相対湿度を用いて式(7.2.2-2)および式(7.2.2-3)で算出する中性化の影響係数 $\beta_1$ および $\beta_2$ の各比率を乗ずることで補正評価し、屋外環境に相当する中性化速度係数を予測する(図7.2.2-1中の③)。

なお、ここで温度・相対湿度による補正は、床下に対して外壁の南面および北面に対して行うこととし、外壁南面/床下および外壁北面/床下の各影響係数の比率を算出する。外壁を対象にして、屋内側の壁を対象外とするのは、第3章の調査結果より中性化による鉄筋腐食が生ずるのは主として屋外環境にある外壁側だからである。また、南面と北面を対象とするのは、第6章で示した測定結果より温度・相対湿度の差異が最大となる外壁の方位が南面と北面だからである。

温度・相対湿度の値は、表7.2.2-1(表4.3.2-5の再掲)および表7.2.2-2(表6.3.4-2の再掲)に示した測定結果の例から設定した。

$$\beta_1 = (T + 27.3) / 47.3 \quad (7.2.2-2)$$

ここで、 $\beta_1$ ：中性化深さに関する温度の影響係数

$T$ ：温度(°C)で、床下は17、外壁南面は19、外壁北面は17、とする。

$$\beta_2 = H_u (100 - H_u) (140 - H_u) / 192000 \quad (7.2.2-3)$$

ここで、 $\beta_2$ ：中性化深さに関する相対湿度の影響係数

$H_u$ ：相対湿度(%)で、床下は80、外壁南面は65、外壁北面は70、とする。

表 7.2.2-1 基礎立上り部の床下の日平均温度および日平均相対湿度の月別平均値の例

測定項目	位置	月別の平均値 (2016年2月～2017年1月)												全体平均
		2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	
温度 (°C)	床下	9.3	10.8	15.0	19.2	21.3	23.8	26.2	24.5	20.1	13.8	10.7	7.9	17.0
相対湿度 (%)	床下	78.1	77.9	78.8	79.8	85.1	89.2	85.1	88.4	85.0	83.4	78.5	73.7	82.0

表 7.2.2-2 1階外壁各方位の日平均温度および日平均相対湿度の月別平均値の例

測定項目	部 位	方 位	月別の平均値 (2016年2月～2017年1月)												全体平均
			2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	
温度 (°C)	外 壁	南	10.6	12.0	16.7	21.3	23.5	26.6	28.8	25.9	21.2	14.5	12.6	10.3	18.8
		北	6.6	9.7	15.6	20.7	22.9	25.7	27.3	24.5	18.6	10.9	7.6	4.3	16.4
相対湿度 (%)	外 壁	南	55.4	58.6	63.0	63.2	69.2	72.2	67.8	74.7	62.6	60.7	51.2	42.8	62.0
		北	64.0	64.9	65.7	63.8	70.9	75.6	76.4	83.5	69.3	71.1	61.9	57.3	68.8

#### (4) 仕上げ材の中性化抵抗による補正評価

屋外環境におけるコンクリートの中性化速度係数に対して、仕上げ材による中性化抵抗を考慮した補正評価を式 (7.2.2-4) 7-2)により行い、仕上げ材が施されたコンクリートの中性化深さを予測する (図 7.2.2-1 中の④)。ここで仕上げ材はモルタル仕上げとし、モルタル仕上げの中性化抵抗は、第 6 章で得られた知見に基づいて表 6.3.3-1 から設定した中性化速度係数とモルタル仕上げの塗厚の関数として算出される。

$$d_c = A_c(\sqrt{t} - R) \quad (7.2.2-4)$$

ここで、 $d_c$  : コンクリートの中性化深さ (mm)

$A_c$  : コンクリートの中性化速度係数 (mm/√年)

$R$  : モルタル仕上げの中性化抵抗 (√年) で、次式による

$$R = d_m / A_m$$

$d_m$  : モルタル仕上げの塗厚 (mm)



$A_m$  : モルタル仕上げの中性化速度係数(mm/√年)で, 外壁南面は 7.7, 外壁北面は 5.0  
t : 経過期間 (年), とする。

#### (5) 中性化深さとかぶり厚さの比較および含水率の判定

第 3 章の調査事例によれば, 中性化領域に鉄筋があっても, 水 (雨) がかり無しの部位で, コンクリートの質量含水率が 3%以下であれば腐食は軽微であった。よって, 中性深さとかぶり厚さを比較し (図 7.2.2-1 中の⑤), 中性化がかぶり厚さ以上に進行していた場合でも, コンクリートの質量含水率が 3%以下の環境であれば (図 7.2.2-1 中の⑥), 耐久性上, 問題となる鉄筋腐食は生じない可能性が高い。

なお, 調査データが十分ではないため, 劣化評価手法のフローにおける本判定部分は今後の検討課題とし, 考え方の提示のみとする。

## 7.3 劣化評価手法の検証

### 7.3.1 検証および検証対象建築物の概要

前節で提案した劣化評価手法のケーススタディの対象としたのは第3章で詳細調査を建築物で、1960年代に建設された現場打ち壁式RC造集合住宅3棟（建築物A、建築物B、建築物C）である。調査対象建築物の概要を表7.3.1-1に示す。

表 7.3.1-1 調査対象建築物の概要

諸元	建築物A	建築物B	建築物C
階数	4階建て	5階建て	5階建て
所在地・竣工年	埼玉県草加市・1963年	東京都足立区・1964年	東京都清瀬市・1967年
調査年(調査時の経過年数)	2016年(53年)	2013年(49年)	2015年(48年)
セメント・コンクリート	N・普通コンクリート	N・普通コンクリート	N・普通コンクリート
設計基準強度 $F_c$	15N/mm <sup>2</sup>	15N/mm <sup>2</sup>	16.5N/mm <sup>2</sup>
部材の設計厚さ	耐力壁：180,150mm 基礎立上り：230mm	耐力壁：180,150mm 基礎立上り：200mm	耐力壁：180,150mm 基礎立上り：200mm
外壁仕上げ	モルタル仕上げの上に、色モルタル吹付	モルタル仕上げの上に、リシン吹付	モルタル仕上げの上に、リシン吹付
外壁改修仕上げ(年)	リシン吹付(1983年)	リシン吹付(1981年)	リシン吹付(不明)

仕上げ材の種類は、基礎立上り部の床下側が打放しコンクリートで、その屋外側および外壁面はモルタル仕上げの上に、表層仕上げとして色モルタル（着色したモルタルで、仕様書上の塗厚は3mm以上）もしくはリシン吹付が施されている。

使用されたコンクリートは、普通ポルトランドセメントによる普通コンクリートで、部位により設計基準強度や仕様に違いはない。

本建築物について、図7.2.2-1のフローにおける、①'実建築物の基礎立上りでコア採取し、床下側の打放しコンクリートの中性化深さを測定→②'床下環境における打放しコンクリートの中性化速度係数を算定→③床下環境における中性化速度係数を屋外環境に補正評価→④仕上げ材の中性化抵抗による補正評価、を行い中性化深さの予測計算をした。その結果とモルタル仕上げが施された外壁コンクリートの各方位面の実測で得られた中性化深さと比較検討を行った。

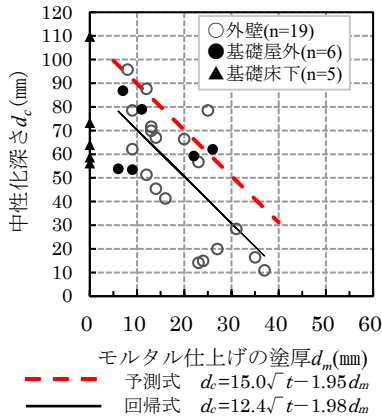
### 7.3.2 検証結果

表 7.3.2-1 に、基礎立上り部床下側で実測した中性化深さ  $d_c$  の平均値、その中性化速度係数  $A_f$ 、温度・相対湿度による中性化進行の影響係数における外壁/床下の比率、 $A_f$  に影響係数の比率を乗じて補正した外壁コンクリート（仕上げ無し）に相当する中性化速度係数  $A_c'$ 、モルタル仕上げの塗厚  $d_m$  10～40 mm まで 10 mm 単位でその中性化抑制効果を考慮して求めた中性化深さ  $d_c$  の算定値を示す。

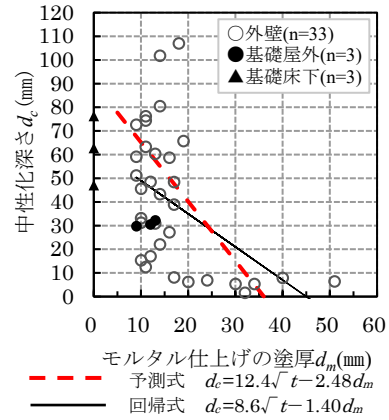
表 7.3.2-1 基礎床下の中性化深さ実測値と外壁コンクリート各方位面の中性化深さ予測値

建築物 外壁の方位	建築物 A		建築物 B		建築物 C	
	南面	北面	南面	北面	南面	北面
基礎床下の実測中性化深さ $d_c$ の平均値 (mm)	54.8		30.5		15.6	
基礎床下の中性化速度係数 $A_f$ (mm/√年)	8.1		4.4		2.3	
温度の影響係数における外壁/床下の比率	1.05	1.00	1.05	1.00	1.05	1.00
相対湿度の影響係数における外壁/床下の比率	1.78	1.53	1.78	1.53	1.78	1.53
外壁(仕上げ無し)の中性化速度係数の予測値 $A_c'$ (mm/√年)	15.0	12.4	8.2	6.7	4.3	3.5
モルタルの塗厚 $d_m$ 10 mm を考慮した予測中性化深さ $d_c$ (mm)	90.0	65.5	46.6	33.7	24.1	17.4
モルタルの塗厚 $d_m$ 20 mm を考慮した予測中性化深さ $d_c$ (mm)	70.5	40.7	36.0	20.2	18.5	10.3
モルタルの塗厚 $d_m$ 30 mm を考慮した予測中性化深さ $d_c$ (mm)	50.9	15.9	25.4	6.7	13.0	3.3
モルタルの塗厚 $d_m$ 40 mm を考慮した予測中性化深さ $d_c$ (mm)	31.4	0	14.8	0	7.4	0

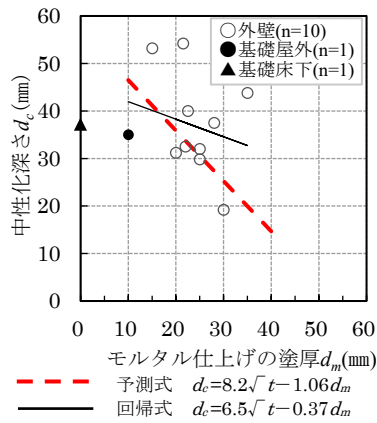
図 7.3.2-1(a)～図 7.3.2-1(f)には、モルタル仕上げの塗厚  $d_m$  および中性化深さ  $d_c$  の各実測結果をプロットし、表 7.3.2-1 に示す外壁各方位における本提案手法で求められた中性化深さの推定式を赤色の点線で、実測結果から求めた回帰式を黒色の実線でそれぞれ示す。なお、中性化深さの予測は、最大値と最小値になると思われる南面と北面について行った。



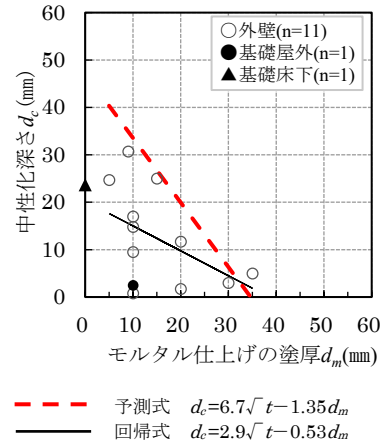
(a) 建築物 A(t=53 年)・南面



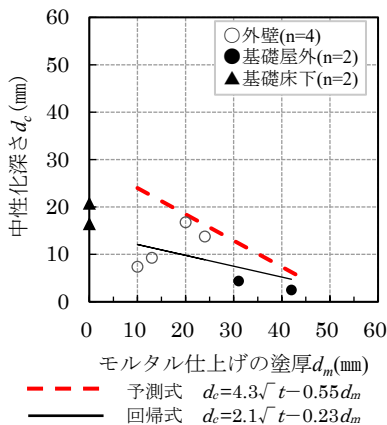
(b) 建築物 A(t=53 年)・北面



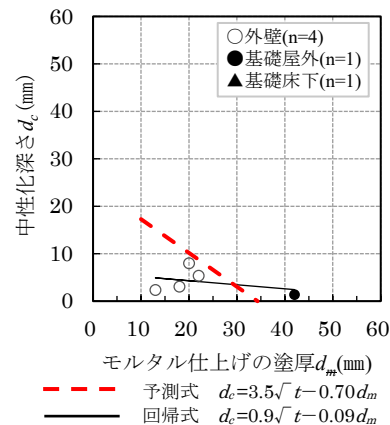
(c) 建築物 B(t=49 年)・南面



(d) 建築物 B(t=49 年)・北面



(e) 建築物 C(t=48 年)・南面



(f) 建築物 C(t=48 年)・北面

図 7.3.2-1 モルタル仕上げの塗厚と中性化深さの実測結果並びにそれらの測定結果から求めた回帰式および本提案手法により算定した中性化深さの予測値との比較

検証結果を以下にまとめる。

- 1) 基礎立上り部床下側の中性化深さを基準値にして、本提案手法により算定した外壁コンクリート屋外側の中性化深さの予測値は、ばらつきがある実測値やそれから求めた回帰式に対して、結果的にやや安全側となる傾向にあった。
- 2) 安全側に評価された要因の一つに、基礎立上り部床下側の中性化速度係数に対して乗じた相対湿度の影響係数における外壁／床下の比率の数値（南面で 1.78，北面で 1.53）が大きかったことが挙げられる。

実測例に基づいて設定した床下と屋外における相対湿度について、実際の値による差異はそれより小さかったか、あるいはその差異が及ぼす中性化進行への影響が小さかったことなどが考えられる。
- 3) モルタル仕上げによる中性化抑制効果について、モルタル仕上げの塗厚が厚くなるほど中性化深さが小さくなる実測値の傾きの傾向と予測式の傾きの傾向は調和的である。北面では塗厚 35 mm 前後で、中性化深さは実測値と予測値ともに 0 mm 近くになっている。

これは、個別建築物におけるコンクリートの中性化進行の評価において、第 6 章で求めたモルタル仕上げの中性化速度係数とモルタル仕上げの塗厚を関数にしたモルタル仕上げの中性化抵抗を用いても実態に即した結果が得られることを示している。
- 4) 中層 5 階程度までの建築物で基礎立上り部と外壁のコンクリートが同一の設計基準強度であり、外壁がモルタル仕上げであることが前提であるが、本研究で検討した中性化に及ぼす環境条件や仕上げ材の影響に関する評価方法は実建築物の劣化調査に適用可能であり、その結果は概ね妥当であることを詳細調査による中性化深さの実測結果と比較検証することで示した。

#### 7.4 まとめ

本章では、第4章から第6章で提案した予測・評価手法を包括的に体系化した建築物の劣化評価手法を提案し、その適用性および妥当性を検証した。ケーススタディとして特定の実建築物3棟の打放しコンクリートおよびモルタル仕上げ材が施されたコンクリートの各方位面の中性化深さを対象に実測調査および予測計算を行い、それらを比較検討した。その結果、提案した方法により、概ね実建築物の中性化進行を予測・評価できることが確認できた。

## 参考文献

- 7-1) 阿部道彦ほか 5 名：コンクリートの促進中性化試験法の評価に関する研究，日本建築学会構造系論文報告集，第 409 号，pp.1-10，1990.3
- 7-2) 馬場明生ほか 1 名：各種の表層面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，Vol.9，No.1，pp.333-338，1987

## 第8章 結論

本研究では、数多くの実建築物の中性化深さを調査し、そこから得た数多くのデータをもとに実建築物におけるコンクリートの中性化進行に及ぼす方位、圧縮強度、仕上げ材などの影響を定量的に解明した。また、各方位面の温度および相対湿度ならびに仕上げ材の塗厚を指標として、実建築物におけるコンクリートの中性化速度係数を適切に評価する方法を提示した。

以下に、本研究で得られた知見を各章ごとに示す。

第1章は序論として、本研究の背景と目的について述べ、研究の方針および構成を示した。

第2章では、実建築物の中性化に影響を及ぼす各種要因に関する既往の研究を調査した。

第3章では、解体除却予定の築後53年を経過した現場打ち壁式RC造の集合住宅1棟を利用して、通常では実施が困難な多数の調査数量に基づく調査を行うこととし、鉄筋腐食状況の把握ならびに鉄筋腐食が生ずる要因を検討するために中性化深さ、かぶり厚さ、仕上げ材の塗厚およびコンクリートの含水率などの測定を実施し、個別建築物における劣化の実態を詳細に把握した。

また、築後48～49年を経過した現場打ち壁式RC造の集合住宅2棟において、建築物の一般的な耐久性調査で実施される調査数量に基づいて、中性化深さの測定などをあわせて実施した。

得られた知見は以下のとおりである。

- (1) 外壁における方位別の中性化深さの比較では、3棟とも調査数量に関わらず全体的な傾向として北面より南面が進行していた。基礎床下は、打放し仕上げであるため、モルタル仕上げが施された外壁に比べて、全体的に中性化が進行していた。
- (2) モルタル仕上げの塗厚とコンクリートの中性化深さに基づいて解析で求めたモルタル仕上げの中性化速度係数  $A_m$  は 5.5～17.7 (mm/√年) と非常に幅がある結果になった。
- (3) 鉄筋の腐食が進行しているのは、中性化領域にあり。かつ屋外側で雨がかり有りの環境条件の場合であった。腐食グレードが高い鉄筋が占める割合が多いが、一方で腐食が軽微なものもあった。
- (4) 屋外側で雨がかり有りの部位におけるコンクリートの質量含水率は、1.1～5.2%であり、方位別の平均値では、北面および東面が3.0%前後と高く、西面および南面が1.5%前後と低



い。降雨によって水が供給された後の乾燥の速さが方位によって違いがあり、日射が影響していると考えられる。本調査結果が、降雨がない日が続いた条件下における測定値から判断すると、降雨時では、5%以上になることが想定される。

- (5) 屋外側もしくは屋内側の中性化領域に鉄筋があっても、雨（水）がかり無しの環境条件では、中性化深さの大小に関わらず腐食は軽微で進行していなかった。雨（水）がかり無しの部位におけるコンクリートの質量含水率は3%以下であった。

第4章では、コンクリートの中性化に環境条件が及ぼす影響を定量的に評価するために、実建築物1210棟の基礎立上り部の打放しコンクリート部分からコア1210本を採取し、圧縮強度と中性化速度係数の関係などに関して、屋外と高湿度環境である床下との比較検討、および方位別における比較検討を行った。また、屋外と床下の環境条件の相違を躯体表層近傍で実測した温度・相対湿度により指標化し、中性化進行の差異と関連づけて考察した。

得られた知見は以下のとおりである。

- (1) 実環境における築後15年以上経過した実建築物から採取したコア1210本について、方位別および部位別（屋外、床下）に分類して中性化速度係数を算出し、その違いが及ぼす影響を定量的に把握した。また、これらの中性化速度係数と圧縮強度の関係式を示した。
- (2) 床下は、屋外と比べると、中性化速度係数は0.7倍程度に抑制されている。また、中性化速度係数の回帰式における決定係数は、床下の方が高かった。床下は、雨がかりや日射の影響がなく、温湿度も屋外に比べて安定しているため、建築物によって環境条件の差異が少ないためと考えられる。
- (3) 屋外の方角別の中性化速度係数は、南面>西面>東面>北面の順で大きく、その比率は南面が北面の1.67倍程度である。一方、床下は日射がないため、方位による影響は表れにくい。
- (4) 基礎立上りの床下側と基礎立上りの屋外側西面における日平均温度および日平均相対湿度の比較では、平均値にして、床下側の方が温度は1.3℃低く、相対湿度は10.8%高かった。
- (5) 実測した温度・相対湿度を、促進中性化試験で用いられている中性化進行の影響係数の式に適用した結果、床下と屋外西面の比率は平均で0.65であり、実測した中性化深さによる中性化比率0.67と概ね一致した。実建築物において、環境条件が局所的に異なる部位間における

中性化進行の差異について、温度および相対湿度を指標にして評価することにより、その傾向を定量的に把握することが可能であることを示した。

第5章では、第4章で調査した実建築物におけるコンクリートの中性化進行のデータを用いて、促進中性化試験の結果から実建築物の中性化の進行を予測する手法の検討を行った。まず、促進中性化試験に関して、これまでは限定された個々の研究成果の報告に留まっていた既往のデータを収集・整理し、圧縮強度と中性化速度係数などに関して総括的な傾向を検討した。そして、実環境における実建築物の中性化と促進中性化試験による中性化の対応に関して、両者における圧縮強度と中性化速度係数の関係式に基づいた中性化速度係数比などを算出し、促進中性化試験の結果から実環境におけるコンクリートの中性化の進行を予測するうえでの目安となる数値を提示した。得られた知見は以下のとおりである。

- (1) 15 件の文献調査を行い、普通ポルトランドセメントを使用したコンクリートの促進中性化試験 68 データによる促進中性化の総括的傾向を検討し、促進中性化速度係数と水セメント比および促進中性化速度係数と圧縮強度の関係式を示した。
- (2) 第4章および本章の分析結果を用いて、促進中性化試験に対する実環境の中性化速度係数比  $R$  の算出事例を示した。実環境における実建築物の屋外側の平均的な中性化の例では、圧縮強度が大きくなるほど  $R$  は大きくなる傾向にあり、 $0.12\sim 0.16$  であった。一方、湿度が高い環境である床下側では、圧縮強度が大きくなるほど  $R$  は逆に小さくなる傾向にあり、 $0.10\sim 0.07$  であった。これらは、従来の考え方で求めた場合の中性化速度係数比  $0.1$  と一致しない結果であった。

第6章では、コンクリートの中性化に仕上げ材が及ぼす影響を定量的に評価するために、実建築物 100 棟の外壁のモルタル仕上げ材が施されたコンクリート部分からコア 200 本を採取した。南面と北面の方位別に圧縮強度、中性化深さ、モルタル仕上げの塗厚を調査し、圧縮強度と中性化速度係数およびモルタル仕上げの塗厚と中性化速度係数の関係などについての検討、仕上げ材が施されたコンクリートの中性化進行モデルに基づきモルタル仕上げの中性化抵抗および中性化速度係数を算出した。得られた知見は以下のとおりである。

- (1) モルタル仕上げの中性化抵抗の平均値は、南面で  $3.83\sqrt{\text{年}}$ 、北面の外側で  $5.13\sqrt{\text{年}}$ 、北面の内側で  $5.00\sqrt{\text{年}}$  であり、 $5.5\sim 6\sqrt{\text{年}}$  で頭打ちになる傾向にあった。モルタル仕上げの中性化速

度係数の平均値は、南面で 7.69 mm/√年、北面の外側で 4.95 mm/√年、北面の内側で 4.98 mm/√年であった。北面の屋外で露出している外側と内側では中性化の傾向に差異は見られなかったが、南面と北面では明確な差異が見られた。

- (2) 同一建築物における南面と北面のモルタル仕上げの中性化速度係数の比率の平均値は 1.62 程度であった。実建築物の各方位の外壁表面近傍で 1 年間、温度および相対湿度を実測し、それから求めた中性化に関する影響係数における南面と北面の比率は、南面と北面の相対湿度の差が大きくなる時期では 1.4～1.6 程度になり、平均では 1.29 であることを示した。
- (3) 方位による環境条件の違いを温度および相対湿度を指標として表すことで、モルタル仕上げが施された実建築物のコンクリートの中性化における方位別の差異を定量化可能であることを明らかにした。また、中性化進行の違いに与える影響には、温度・湿度そのものによる差異以外に、その温度・湿度の差異に起因した仕上げ材の材料的な劣化状態の差異がある可能性を示した。

第 7 章では、第 4 章から第 6 章で提案した予測・評価手法を包括的に体系化した建築物の劣化評価手法を提案し、その適用性および妥当性を検証した。すなわち、ケーススタディとして特定の実建築物の打放しコンクリートおよびモルタル仕上げ材が施されたコンクリートの各方位面の中性化深さを対象に実測調査および予測計算を行い、それらを比較検討した。その結果、提案した方法により、概ね実建築物の中性化進行を予測・評価できることを確認した。

## 謝辞

本論文は、筆者が平成 26～29 年にかけて、独立行政法人都市再生機構に在職中（平成 27～29 年は国立研究開発法人建築研究所に出向中）、ならびに宇都宮大学大学院工学研究科システム創成工学専攻博士後期課程に在学中に行った実建築物の中性化に及ぼす各種影響の解明と劣化評価への応用に関する研究成果をとりまとめたものです。

本研究の過程において、終始懇切なるご指導とご鞭撻を賜り、本論文をまとめるに際して、貴重なご助言と力強い励ましをいただいた、主任指導教員である宇都宮大学大学院工学研究科教授 杉山央博士に深謝申し上げます。

本論文の審査過程において、数々のご助言とご指導を賜りました、宇都宮大学大学院工学研究科教授 藤原浩巳博士（副指導教員）、同 准教授 丸岡正知博士（副指導教員）、同 教授 中島史郎博士（審査委員）、同 准教授 藤本郷史博士（審査委員）に深謝申し上げます。

副専門科目の履修においては、宇都宮大学大学院工学研究科教授 増田浩志博士に建築構造に関して、同 教授 三橋伸夫博士に建築計画に関してご助言とご指導を賜り、博士論文で取組んだ分野以外の知識を深める機会を与えていただきました。ここに深謝申し上げます。

本論文で取組んだ研究内容の一部は、独立行政法人都市再生機構に設置された鉄筋コンクリート造の耐久性能に関する委員会内の調査研究活動として筆者が担当したものであり、委員長である宇都宮大学名誉教授 榊田佳寛博士、委員である芝浦工業大学准教授 濱崎仁博士、東京理科大学教授 今本啓一博士、国土技術政策総合研究所主任研究官 土屋直子博士、株式会社 LC 総合サービス（当時） 新岡輝雄氏には数々のご指導とご助言を賜りました。ここに深謝申し上げます。

本研究にかかる調査の実施には、株式会社コンクリート診断センター、住友大阪セメント株式会社、株式会社東京ソイルリサーチ、日本総合住生活株式会社、株式会社八洋コンサルタント、株式会社 UR リンテージの皆様にも多大なるご協力をいただきました。また、一般社団法人建築研究振興協会の田山隆文氏には、既往のコンクリートコアデータを提供していただきました。有限会社眞テクノラボの佐藤眞一郎氏には、温度・湿度の計測方法についてご助言をいただきました。既往の促進中性化試験データの収集および整理には、宇都宮大学大学院（当時）の SUSAN 氏にも多大なるご協力をいただきました。関係する皆様に深謝申し上げます。

INO 建築構造研究室の井上芳生氏には、筆者が住宅・都市整備公団（現・独立行政法人都市再生機構）に入社以来、鉄筋コンクリート造の設計・施工に関して数多くのご指導と激励を賜りました。ここに深謝申し上げます。

本研究をとりまとめる貴重な機会と格別のご支援をいただきました独立行政法人都市再生機構の皆様および国立研究開発法人建築研究所の皆様にも深謝申し上げます。

平成 29 年 3 月  
田沼毅彦

## 本研究に関連する発表論文

### 【査読付き論文】

(1) 田沼毅彦, 杉山央 :

実建築物におけるコンクリートの中性化進行の分析およびその予測手法の提案,  
日本建築学会構造系論文集, 第 720 号, pp.167-176, 2016.2

[関連する章 : 第 4 章, 第 5 章]

(2) 田沼毅彦, 杉山央, 梶田佳寛 :

外装仕上げとしてモルタル塗りを施した鉄筋コンクリート造建築物の中性化進行,  
日本建築学会技術報告集, vol.23, No.53, pp.31-36, 2017.2

[関連する章 : 第 3 章]

(3) 田沼毅彦, 杉山央 :

築後 53 年を経過した鉄筋コンクリート造建築物における鉄筋腐食状況の実態調査,  
日本建築学会技術報告集, vol.23, No.53, pp.37-42, 2017.2

[関連する章 : 第 3 章]

(4) 田沼毅彦, 杉山央 :

鉄筋コンクリート造建築物の中性化進行に及ぼすモルタル仕上げおよび方位の影響,  
日本建築学会構造系論文集, 第 735 号, 2017.5 掲載予定 (2017.2 採用決定)

[関連する章 : 第 6 章]