

# 論文 複数回の実建物調査に基づく高経年建物の中性化進行予測に関する考察

堀込 克哉\*1・角谷 慎太郎\*2・原 孝士郎\*2・木村 博\*3

**要旨**：鉄筋コンクリート構造物においては、その劣化状態を適切に評価し、維持管理していくことが重要である。 $\sqrt{t}$  則により中性化深さの実測値から調査時以降の中性化進行を推定する手法が用いられているが、その推定結果と実際の中性化の進行状況を実建物で確認した事例は少ない。そこで、過去の中性化深さの測定箇所近傍で、過去調査から 30 年以上の期間を空けて測定した中性化深さの実測値と、 $\sqrt{t}$  則で予測した今回調査時の推定値とを比較した結果、仕上げが打放しおよび塗装の場合、精度の高い予測ができた。仕上げがモルタルを含む場合、推定値が実測値よりも大きめの値となり安全側の予測ができていることを確認した。

**キーワード**：中性化、進行予測、コンクリート、仕上げ、等価かぶり厚さ

## 1. はじめに

1960～70 年代の高度経済成長期に建設された鉄筋コンクリート造の電力インフラ設備は、50 年以上経過した現在でも、補修とメンテナンスを繰り返しながら継続して使用されている。そのため、これらの構造物の劣化状態を適切に評価し、維持管理していくことが重要と言える。鉄筋コンクリート構造物の劣化要因の 1 つである中性化は、大気中の二酸化炭素がコンクリート内に侵入し、コンクリートの pH を低下させる現象である。中性化が進行するとコンクリート内部の鉄筋に腐食が生じ、ひび割れやかぶりコンクリートの剥離・剥落、部材の性能低下を引き起こす可能性があることから、中性化は鉄筋コンクリート構造物の維持管理において重要な劣化指標である。日本建築学会が刊行する「建築工事標準仕様書・同解説 (JASS5)」<sup>1)</sup>では、中性化の進行予測手法として式 (1)の $\sqrt{t}$  則が示されている。

$$C = A\sqrt{t} \quad (1)$$

ここで、 $C$ ：中性化深さ (mm)

$A$ ：中性化速度係数 (mm/ $\sqrt{\text{年}}$ )

$t$ ：経過年数 (年)

$\sqrt{t}$  則は、調査時点の中性化深さの実測値 $C$ と経過年数 $t$ から中性化速度係数 $A$ を算定し、調査時以降の中性化の進行を推定する手法である。しかし、その推定結果と実際の中性化の進行状況を実建物で確認した事例は少なく、前回の調査時から期間を空けて、前回の調査箇所の近傍で再度、中性化深さを測定している事例<sup>2)</sup>はあるが、調査の間隔は 10 年程度と比較的短い。

そこで本研究では、過去に中性化深さを測定した箇所の近傍で、過去調査時から 30 年以上の期間を空けて今回測定した中性化深さの実測値と、過去調査の中性化深

さの実測値から $\sqrt{t}$  則で予測した今回調査時点の中性化深さの推定値を比較検証した。

## 2. 検証建物の選定

### 2.1 選定方法

過去に中性化深さを測定したことのある建物 443 棟の中から、電力インフラ設備建物で多く使われている仕上げの種類および竣工年で多い年代から今回の検証建物 3 棟を選定した。図-1 に 443 棟の過去の調査箇所の仕上げ種類の割合を示す。割合が最も高い仕上げの種類はモルタル+塗装仕上げ (42%) で、次いで、モルタル仕上げ (33%)、打放し (15%)、塗装仕上げ (10%) の順である。図-2 に過去に中性化深さを測定したことのある建物 443 棟の竣工年の分布を示す。竣工年で多い年代は、1960 年代 (128 棟)、1970 年代 (106 棟)、1920 年代 (58 棟)、1950 年代 (50 棟)、1930 年代 (40 棟)、1940 年代 (18 棟) の順に続く。

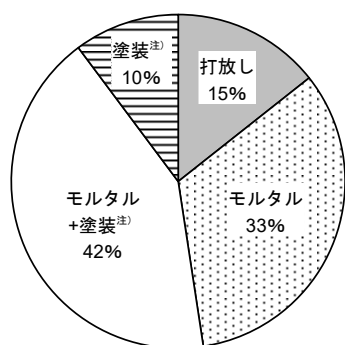
### 2.2 選定結果

検証建物は、様々な仕上げの種類について検証を実施する観点から、過去に複数の仕上げの種類で中性化深さを測定していた建物を抽出した。また、検証建物の年代をばらけさせるため、抽出した建物の中から、図-2 で示した竣工年の分布の比較的多い年代 (1950 年代、1960 年代、1970 年代) の建物を 1 棟ずつ選定した。表-1 に選定した検証建物 3 棟の概要を示す。検証建物の竣工年は、建物 A が 1962 年、建物 B が 1957 年 (増築棟は 1971 年)、建物 C が 1971 年である。それぞれ今回調査時点 (2023 年時点) で竣工から 52～66 年経過しており、過去調査は竣工から 17～28 年経過時点で実施されている。

\*1 清水建設 (株) 建築総本部 原子力・火力本部 (正会員)

\*2 東京電力ホールディングス (株) 技術戦略ユニット 土木・建築統括室

\*3 清水建設 (株) 建築総本部 原子力・火力本部 (正会員)



注) 塗装にはペイント、リシン、吹付タイルを含む。

図-1 過去の調査箇所の仕上げ種類の割合 (443 棟)

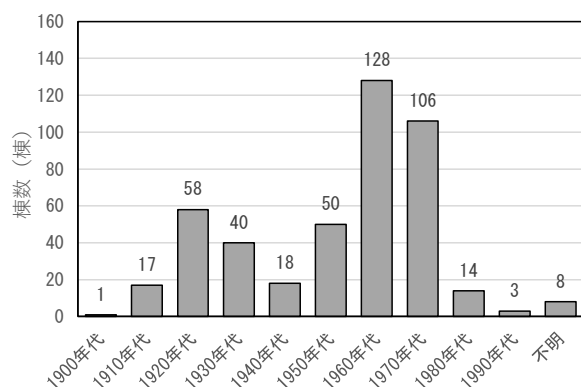


図-2 竣工年の分布 (443 棟)

### 2.3 調査箇所

今回の調査箇所は、図-1 で示した過去の調査箇所の仕上げの種類 (打放し、塗装、モルタル、モルタル+塗装) を満遍なく調査できるように選定した。表-2 に調査箇所とその箇所の仕上げの種類を示す。各建物での調査場所は3箇所とし、すべて壁部材を対象とした。なお、建物Bは過去に外壁面から貫通コアを採取し、屋内側と屋外側の両方の中性化深さを測定していることから、今回の調査でも貫通コアを採取し、外壁面の両側の中性化深さを測定することとした。仕上げ種類ごとの調査箇所数は、打放しが3箇所、塗装仕上げ (リシン) が2箇所、モルタル仕上げが2箇所、モルタル+塗装仕上げ (ペイント、もしくはリシン) が5箇所、調査箇所数の合計は12箇所である。塗装については、検証建物3棟ともに定期的に状態等を確認し、必要に応じて、改修を行っている。

### 2.4 中性化深さ測定方法

中性化深さの測定は、過去調査時と同様にコアの割裂面で実施した。コアは過去の採取位置の近傍 (30cm 程度) でφ80mm程度を1本採取し、JISA 1152 に準拠してコア割裂面にフェノールフタレイン溶液を噴霧して中性化深さを測定した。

表-1 検証建物の概要

建物名	建物 A	建物 B	建物 C
所在地	東京都	埼玉県	東京都
階数	地上3階	地上2階	地上3階
竣工年 (調査時材齢)	1962年 (61年)	1957年※ (66年)	1971年 (52年)
過去調査年 (調査時材齢)	1988年 (26年)	1985年 (28年)	1988年 (17年)

※増築棟の竣工年は1971年で調査時材齢は52年である。

表-2 調査箇所

建物名	調査箇所	場所	環境区分	仕上げ種類
建物 A	A-1	1階	屋内	打放し
	A-2	1階	屋内	モルタル+塗装*1
	A-3	2階	屋内	モルタル
建物 B	B-1	本館 1階	屋内	モルタル
			屋外	塗装*2
	B-2	増築棟 1階	屋内	打放し
	B-3	本館 2階	屋外	モルタル+塗装*2
			屋内	モルタル+塗装*1
建物 C	C-1	2階	屋内	モルタル+塗装*1
	C-2	2階	屋内	モルタル+塗装*1
	C-3	1階	屋内	打放し

\*1: 調査箇所の塗装の種類はペイントである。

\*2: 調査箇所の塗装の種類はリシンである。

### 3. 調査結果

表-3 に中性化深さの測定結果を示す。今回調査時の中性化深さの実測値は、仕上げが打放しの箇所では、平均値が28.9~49.9mm、最大値が39.0~54.0mm、仕上げが塗装の箇所では、平均値が24.6~25.3mm、最大値が28.0~33.5mmであり、いずれの箇所も過去調査時の実測値よりも今回調査時の実測値の方が大きい値となっており、過去調査時からの中性化の進行が確認された。

仕上げがモルタルの箇所については、調査箇所A-3ではモルタル部分は完全に中性化しており、躯体コンクリートの中性化が進行していた。一方で、調査箇所B-1(屋内)では、モルタル部分は仕上げ厚さの半分程度が中性化している段階にも関わらず、躯体コンクリートの中性化の進行が確認された。調査箇所B-1の中性化の進行状況を写真-1に示す。このような事象は既往の文献においても確認されており、モルタルを層状に塗り重ねていく際に生じた密着の不完全な隙間から空気が侵入した場合<sup>3)</sup>、かつ、水セメント比が高くコンクリート中のアルカリ量が少ない透気性の高い場合<sup>4)</sup>に生じる可能性があると考えられている。仕上げがモルタルの箇所は、今回調査時の中性化深さの実測値の平均値が10.1~13.5mm、最大値が

表-3 中性化深さ測定結果

建物名	調査箇所	場所	環境区分	仕上げ種類	中性化深さの実測値 (mm)				モルタル厚さ (mm)
					過去調査時		今回調査時		
					平均値	最大値	平均値	最大値	
建物 A	A-1	1階	屋内	打放し	20.0	25.0	28.9*1	40.5*1	—
	A-2	1階	屋内	モルタル+塗装	5.0	12.0	3.4	7.0	20.0*3
	A-3	2階	屋内	モルタル	18.5	22.0	10.1*1	19.5*1	10.0*3
建物 B	B-1	本館 1階	屋内	モルタル	21.0	23.0	13.5*1,2	23.5*1,2	12.0*4
			屋外	塗装	23.0	29.0	25.3*1	33.5*1	—
	B-2	増築棟 1階	屋内	打放し	18.0	20.0	36.4	39.0	—
			屋外	モルタル+塗装	4.0	5.0	6.7	8.0	19.0*3
	B-3	本館 2階	屋内	モルタル+塗装	2.0	10.0	0.0	0.0	22.0*4
			屋外	塗装	20.0	24.0	24.6	28.0	—
建物 C	C-1	2階	屋内	モルタル+塗装	2.0	3.0	1.9	3.5	26.0*4
	C-2	2階	屋内	モルタル+塗装	2.0	5.0	2.2	3.0	21.0*4
	C-3	1階	屋内	打放し	32.0	34.0	49.9	54.0	—

\*1: 中性化の進行がまだらな箇所のデータ \*2: モルタルが完全に中性化する前に躯体コンクリートの中性化の進行している箇所のデータ  
\*3: 今回調査時にモルタル部分が完全に中性化していた箇所 \*4: 今回調査時にモルタル部分が完全に中性化していない箇所

19.5~23.5mm であり、過去調査時の実測値と比較してほとんど変化はなく、中性化の進行が非常に遅いことが確認された。これはモルタルによって二酸化炭素の浸透が抑制されていると考えられ、モルタル仕上げは打放しや塗装仕上げの場合と比較し高い中性化抑制効果を有していることが確認された。

仕上げがモルタル+塗装の箇所においては、調査箇所 A-2 および B-2(屋外)ではモルタル部分は完全に中性化していた。一方で、調査箇所 B-3(屋内)、C-1、C-2 ではモルタル部分はわずかに中性化している状態で、躯体コンクリートもほとんど中性化していなかった。仕上げがモルタル+塗装の箇所の今回調査時の中性化深さの実測値は、平均値が 0.0~6.7mm、最大値が 0.0~8.0mm であり、過去調査時の実測値と比較してほとんど変化はなく、モルタル+塗装仕上げが高い中性化抑制効果を有していることが確認された。

なお、調査箇所 A-1、A-3 および B-1 においては、写真-1 に示した調査箇所 B-1 の中性化の進行状況のように、中性化の進行が断面方向に一律ではなく、フェノールフタレイン溶液による赤紫色の呈色が不鮮明で中性化の進行がまだらな箇所が確認された。そのため、このような箇所では、JISA 1152 に記載のとおり、鮮明な赤紫色の部分までの距離を中性化深さとして測定するとともに、薄赤紫色の部分までの距離も測定した。なお、表-3 に示した中性化の進行がまだらな箇所の中性化深さは、鮮明な赤紫色の部分までの距離を測定した値である。

#### 4. 検証と結果

##### 4.1 中性化進行の推定方法

式(1)に示した $\sqrt{t}$ 則を用い、過去調査時の中性化深さの

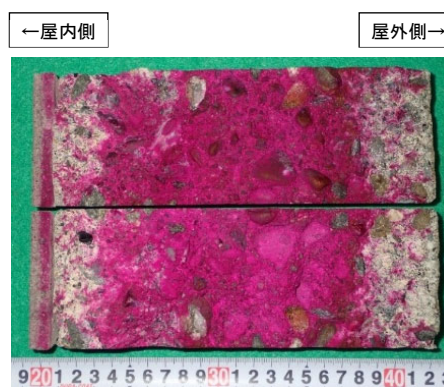


写真-1 中性化の進行状況 (調査箇所 B-1)

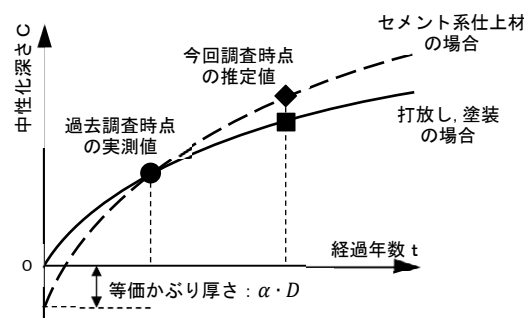


図-3 中性化深さの推定方法の概念

実測値から今回調査時点の中性化深さを推定した。図-3 に中性化深さの推定方法の概念を示す。図-3 では仕上げが打放しの場合の中性化の開始位置を躯体コンクリートの表面 (中性化深さ=0mm) とした。また、仕上げ種類が塗装などの非セメント系の場合には、仕上材の経年劣化により効果が徐々に喪失する<sup>5)</sup>ため、中性化抑制効果は考慮せず、中性化の開始位置は打放しの場合と同様に躯体コンクリートの表面とした。一方、仕上げがモ

ルタルなどのセメント系の場合には、仕上材自身の中性化が進行し、その後、躯体コンクリートの中性化が始まる<sup>6)</sup>。また、モルタルとコンクリートの中性化の進行速度は異なるため、モルタル厚さに一定の係数を掛けることでモルタル部分をコンクリートに相当した厚さとする等価かぶり厚さ<sup>7)</sup>を算定し、中性化の開始位置とした。モルタルなどのセメント系の仕上材の場合の中性化の進行予測式を式(2)<sup>8)</sup>に示す。等価かぶり厚さに換算する係

数 $\alpha$ は既往の文献<sup>7)8)</sup>で提案されているが、今回は $\alpha = 0.5$ として検証を実施した。

$$C = A'\sqrt{(t - \alpha \cdot D)} \quad (2)$$

ここで、 $C$ ：中性化深さ (mm)

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

$t$ ：経過年数 (年)

$\alpha$ ：等価かぶり厚さに換算する係数

$D$ ：モルタル厚さ (mm)

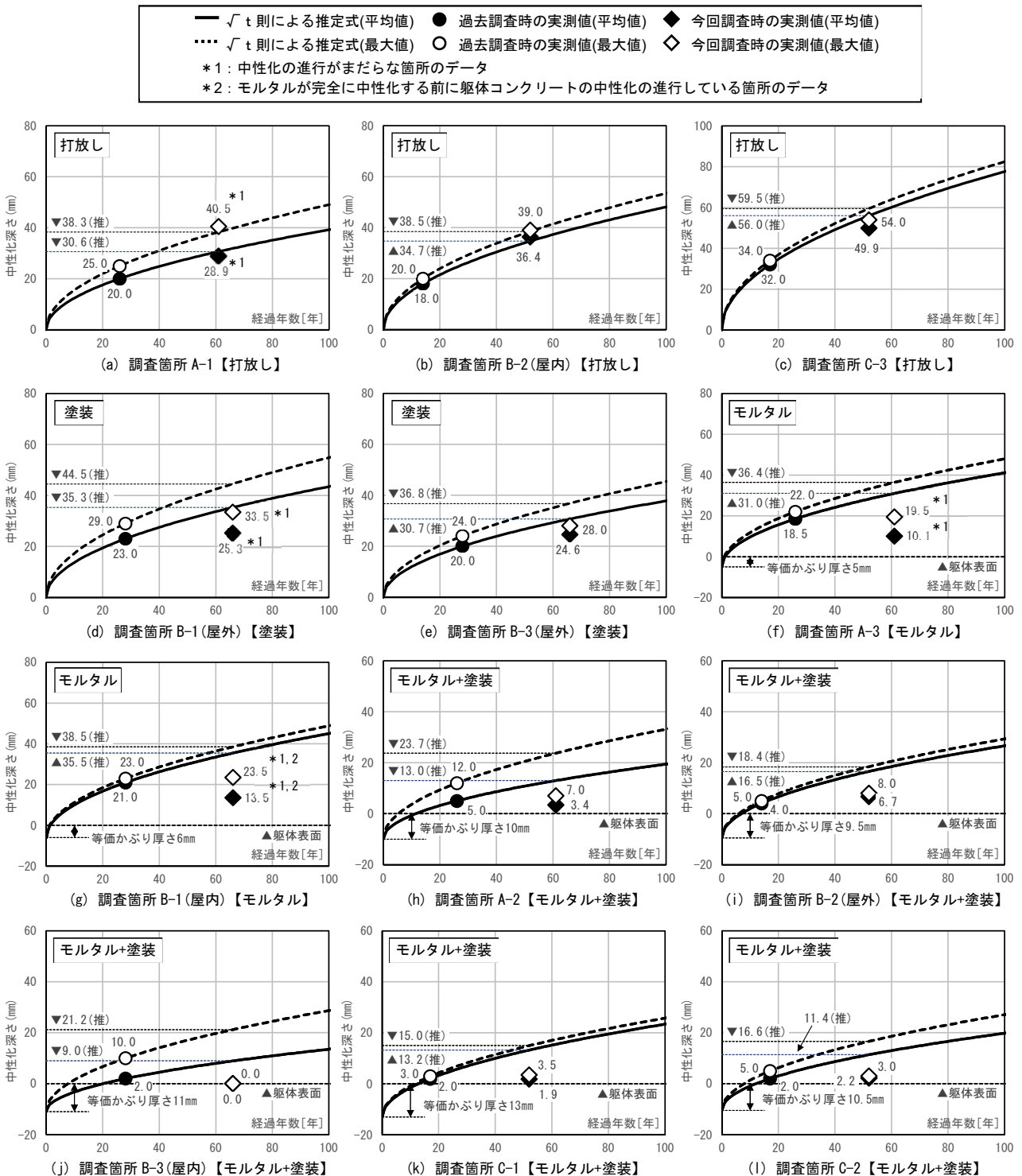


図-4  $\sqrt{t}$  則による推定値と実測値との比較

## 4.2 検証と結果

今回調査時の中性化深さの実測値と、過去調査時の中性化深さの実測値から $\sqrt{t}$ 則で今回調査時点の中性化深さを予測した推定値との比較を行った。なお、検証では、中性化深さの実測値のうち、平均値を用いて比較した場合と、最大値を用いて比較した場合について確認を行った。図-4に $\sqrt{t}$ 則による推定値と実測値との比較を示す。

### (1) 打放し

仕上げが打放しである調査箇所は A-1, B-2(屋内), C-3 であり、3 箇所ともに今回調査時の中性化深さの実測値と、過去調査時の中性化深さの実測値から $\sqrt{t}$ 則で今回調査時点の中性化深さを予測した推定値は、ほぼ一致しており、 $\sqrt{t}$ 則により精度の高い予測ができていることを確認した。特に、調査箇所 B-2(屋内)においては、平均値で比較した場合、実測値が 36.4mm, 推定値が 34.7mm で、最大値で比較した場合、実測値が 39.0mm, 推定値が 38.5mm であり、非常に精度高く予測ができていた。また、調査箇所 A-1 については、今回の中性化深さの実測において、中性化の進行が断面方向に一樣ではなく、フェノールフタレイン溶液による赤紫色の呈色が不鮮明で中性化の進行がまだらな箇所であったが、このような箇所でも精度の高い予測が可能であった。

### (2) 塗装

仕上げが塗装である調査箇所は B-1(屋外), B-3(屋外)の 2 箇所であり、調査箇所 B-3(屋外)においては、平均値で比較した場合、実測値が 24.6mm, 推定値が 30.7mm で、最大値で比較した場合、実測値が 28.0mm, 推定値が 36.8mm であり、推定値は実測値よりもやや大きめの値となっていた。また、調査箇所 B-1(屋外)においても調査箇所 B-3(屋外)と同様に推定値は実測値よりもやや大きめの値となっており、仕上げが塗装の場合にもある程度の精度で安全側の予測ができていることを確認した。

### (3) モルタル

仕上げがモルタルである調査箇所は A-3, B-1(屋内)の 2 箇所である。モルタルとコンクリートの中性化の進行速度は異なるため、モルタルの仕上げ厚さに換算係数  $\alpha = 0.5$  を掛けることでモルタル部分をコンクリートに相当した厚さとする等価かぶり厚さを中性化の開始位置として検証を行った。調査箇所 A-3, B-1(屋内)ともに今回調査時の中性化深さの実測値は、過去調査時の実測値とほとんど変わらない、もしくは過去調査時よりも小さい値であったため、過去調査時の中性化深さの実測値から $\sqrt{t}$ 則で予測した推定値は、今回調査時の実測値よりも大きい値となっていた。そのため、実状よりも中性化が早く進行するという予測になっているが、推定値は安全側の結果となっていることを確認した。

### (4) モルタル+塗装

仕上げがモルタル+塗装である調査箇所は A-2, B-2(屋外), B-3(屋内), C-1, C-2 の 5 箇所であり、等価かぶり厚さを中性化の開始位置として検証を行った。調査箇所 B-3(屋内), C-1, C-2 はモルタル部分に未中性化の部分が残っている状況で、調査箇所 A-2 および B-2(屋外)はモルタル部分が完全に中性化していたが、躯体コンクリートの中性化の進行はわずかであった。そのため、すべての箇所で、過去調査時の中性化深さの実測値から予測した推定値は、今回調査時の実測値よりも大きい値となっており、中性化の進行が実状よりも早く予測していることを確認した。ただし、塗装は経年と共に劣化し、中性化抵抗性が徐々に失われるため、塗装の改修を全く行わなかった場合には、2 回目以降の調査時の実測値が過去の調査時からの推定値よりも大きく、危険側の予測となることも想定されることから、注意が必要と考える。

なお、今回の検証のように、過去の調査箇所の近傍で過去調査時から時間を空けて中性化深さを測定した場合には、今回の実測値を用いて $\sqrt{t}$ 則で調査時点以降の中性化の進行曲線を見直すことにより、より実状に近い中性化の進行予測となると考える。

## 5. まとめ

過去に中性化深さを測定した箇所の近傍で、過去調査時から時間を空けて再度測定した中性化深さの実測値と、過去調査時の中性化深さの実測値から $\sqrt{t}$ 則で今回調査時点の中性化深さを予測した推定値の比較を行い、下記の知見を得た。

- (1) 近傍の箇所で測定を行った過去調査時と今回調査時の中性化深さの実測値を比較した結果、仕上げが打放しおよび塗装の場合には、すべての箇所で過去調査時よりも今回調査時の方が中性化深さの実測値は大きい値となっており、過去調査時からの中性化の進行が確認された。一方で、仕上げがモルタルおよびモルタル+塗装の場合には、今回調査時の実測値は過去調査時と比較してほとんど変化はなく、中性化の進行が非常に遅いことが確認された。
- (2) 今回調査時の中性化深さの実測値と、過去調査時の実測値から $\sqrt{t}$ 則で予測した推定値を比較した結果、仕上げが打放しの場合には、すべての箇所で両者の値は非常に近い値となっており、非常に精度高く予測ができていた。
- (3) 仕上げが塗装の場合には、推定値は実測値よりもやや大きめの値となっていたが、ある程度の精度で安全側の予測ができていた。
- (4) 仕上げがモルタルおよびモルタル+塗装の場合には、

推定値は実測値よりも大きめの値となっていた。そのため、実状よりも中性化が早く進行するという予測となったが、推定値はすべての箇所ですべての箇所で安全側の結果となっていた。ただし、塗装は経年と共に劣化し、中性化抵抗性が徐々に失われるため、塗装の改修を全く行わなかった場合には、危険側の予測となることも想定されることから、注意が必要と考える。

- (5) 調査箇所の中には、フェノールフタレイン溶液による赤紫色の呈色が不鮮明で中性化の進行がまだらな箇所が確認されたが、推定値と実測値の関係性は、中性化の進行が断面方向に一樣な他の箇所と同様の傾向を示した。
- (6) 今回の検証のように、過去の調査箇所の近傍で過去調査時から時間を空けて中性化深さを再度測定した場合には、今回の実測値を用いて $\sqrt{t}$ 則で調査時点以降の中性化の進行曲線を見直すことにより、より実状に近い中性化の進行予測となると考える。

#### 参考文献

- 1) 日本建築学会：建築工事標準仕様書 JASS 5 鉄筋コンクリート工事，2022
- 2) 佐野市：佐野市文化会館施設劣化調査及び PFI 導入可能性調査業務委託 施設劣化調査及び施設整備計

画報告書，令和 3 年 3 月

- 3) 田中 斉：建築物の劣化調査および補修対策の事例報告，コンクリート工学，Vol.48，No.8，pp.76-79，2010.8
- 4) 古賀 一八，林 典男，平田 延明：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.783-788，2008.7
- 5) 三好 夏恵，酒井 正樹，岸 浩行，城戸 隆宏：五反田計画（仮称）における部分的に中性化した既存地下躯体の再利用，コンクリート工学，Vol.61，No.9，pp.848-853，2023.9
- 6) 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
- 7) 川西 泰一郎，濱崎 仁，榎田 佳寛：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 年 10 月
- 8) 国土交通省 国土技術政策総合研究所：中古住宅流通促進・ストック再生に向けた既存住宅等の性能評価技術の開発，国総研プロジェクト研究報告，第 60 号，平成 30 年 2 月