

**M3 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**

日本大学, ものつくり大学

➤はじめに

【国土交通省告示 第1347号】

既存住宅における住宅性能表示制度

【国土交通省告示 第209号】

長期使用構造等をするための措置及び維持保全の方法の基準

しかし、仕上材等の措置については、既存鉄筋コンクリートの条件に左右されるため、標準的な評価方法が確立していない。

調査目的および検討項目

■調査目的

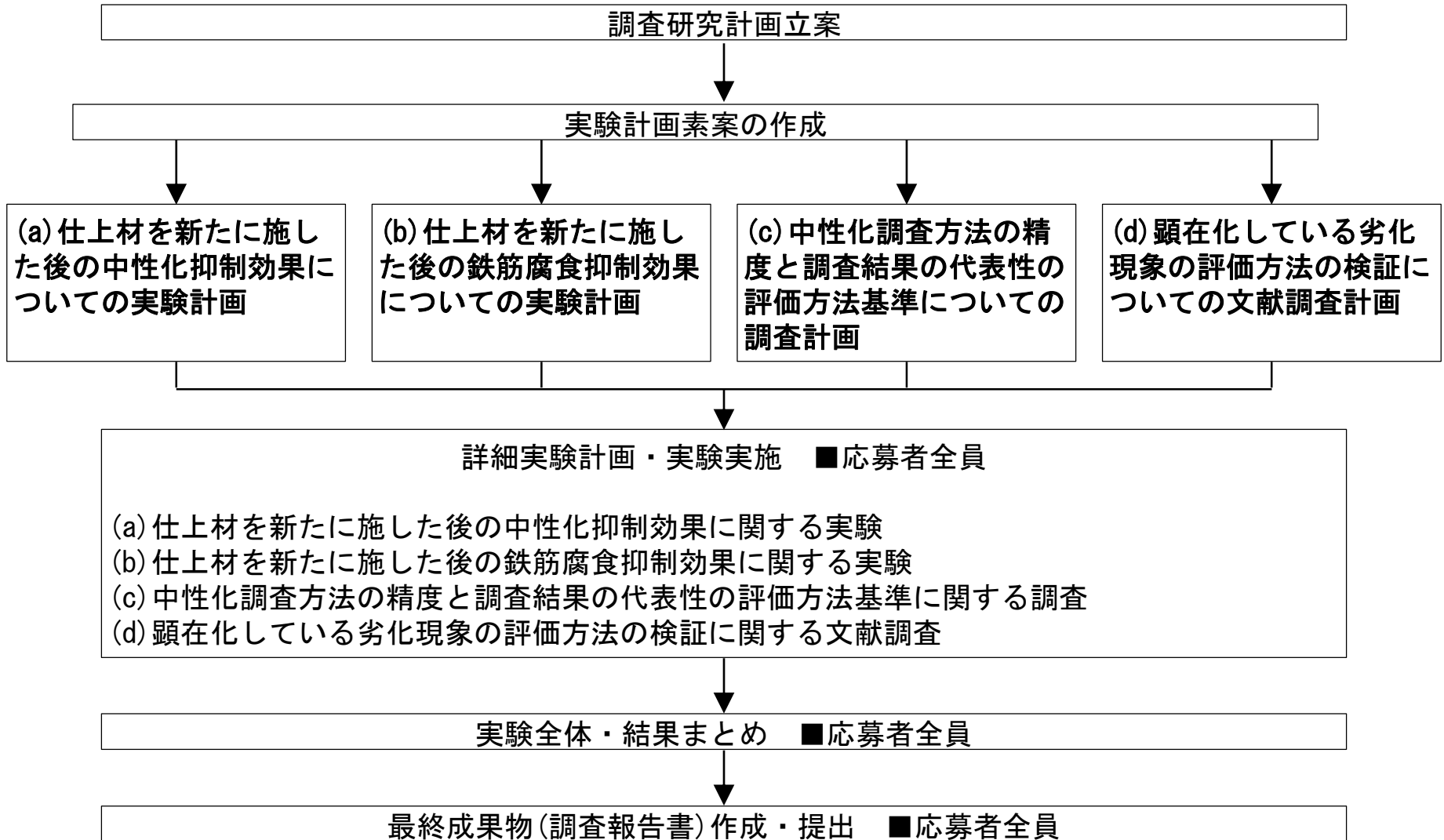
既存鉄筋コンクリート造建築物の劣化(抑制)対策のうち、仕上材を施すなどコンクリートの鉄筋腐食を抑制する措置に対する評価方法を定める。

■検討項目

＜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の評価方法の検討＞

- (a) 仕上材を新たに施した後の中性化抑制効果に関する検討
- (b) 仕上材を新たに施した後の鉄筋腐食抑制効果に関する検討
- (c) 中性化調査方法の精度と調査結果の代表性の評価方法基準に関する調査
- (d) 顕著化している劣化現象の評価方法の検証に関する文献調査

実施体制



試験体の概要 (検討項目a)

■ 模擬壁部材

作製年 : 2014年

暴露場所 : ものつくり大学 (埼玉県)

表 コンクリートの調合条件

結合材の種類	N	N+B F		N+F A	
		高炉セメント		フライアッシュセメント	
		B種相当	C種相当	B種相当	C種相当
混和材の置換率	—	結合材 (kg/m ³) × 45%	結合材 (kg/m ³) × 70%	結合材 (kg/m ³) × 20%	結合材 (kg/m ³) × 30%
水結合材比 ([] 内は調合 記号を示す)	47% [N47] 60% [N60]	47% [N+BF ⁽⁴⁵⁾ 47] 60% [N+BF ⁽⁴⁵⁾ 60]	47% [N+BF ⁽⁷⁰⁾ 47]	47% [N+FA ⁽²⁰⁾ 47] 60% [N+FA ⁽²⁰⁾ 60]	47% [N+FA ⁽³⁰⁾ 47]
フレッシュ コンクリートの 目標値	スランプ : 18±2.5cm 空気量 : 4.5±1.5%				

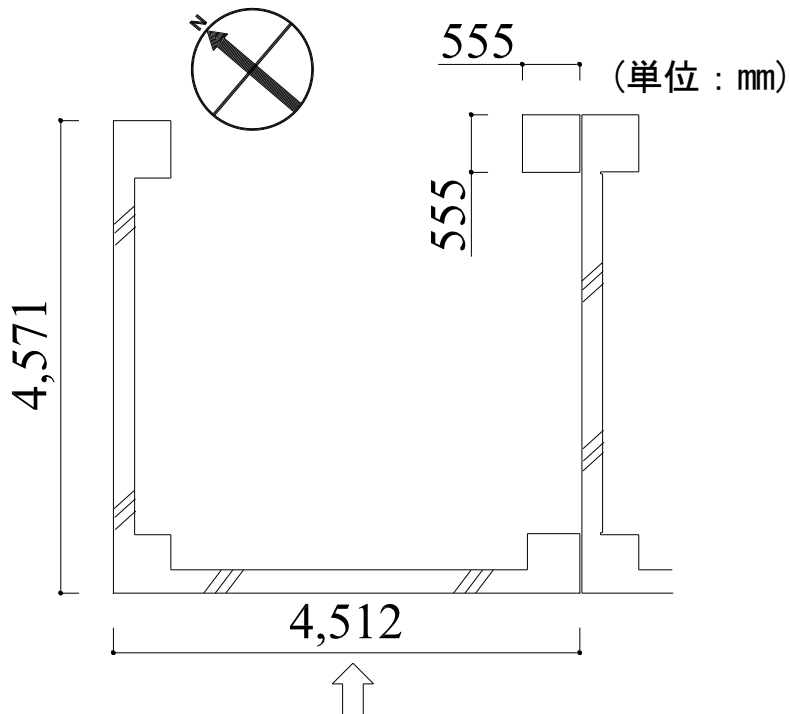
試験体の概要 (検討項目 a, b)

■ 実大壁部材

作製年 : 2003年, 2005年, 2006年

暴露場所 : ものつくり大学 (埼玉県)

コンクリートの種類 : N 水セメント比 : 53.5% 調査記号 : **N53.5**



↑
コアの採取位置

図 実大壁部材平面図



写真 実大壁部材

試験体の概要 (検討項目a)

■ 試験体

作製年 : 1991年

暴露場所 : 北海道岩内郡共和町梨野舞納

コンクリートの種類 : N 水セメント比 : 60% 調合記号 : **N60**

表 既に施された仕上材の種類	
表面被覆材	リシン
	マスチック
浸透性吸水防止剤	シラン系
	シリコーン系
	無機系
	アクリル系
透水型枠	微細孔フィルム
塗装合板	塗装合板仕上げ



写真 試験体

➤ a. 中性化抑制効果に関する検討(要因と水準)

表 要因と水準

試験体の名称	模擬壁部材	実大壁部材	試験体
結合材の種類	普通ポルトランドセメント[N], 高炉スラグ微粉末[BF], フライアッシュ[FA]	普通ポルトランドセメント[N]	
水結合材比 (W/B)	47%, 60%	53.5%	60%
作製年	2014年	2003年, 2005年, 2006年	1991年
既に施された 仕上材	打放し		リシン(無機系), マスチック(合成樹脂エマルション系), 浸透性吸水防止剤(シラン系, シリコン系, アクリル系, 無機系), 透水型枠(微細孔フィルム), 打放し
新たに施す 仕上材	ポリマーセメントモルタル 厚5mm, 10mm[PCM5], [PCM10] 亜硝酸リチウム添加ポリマーセメントモルタル 厚2mm[LN+PCM2], ケイ酸塩系リチウム+ポリマーセメントモルタル 厚2mm[Si+PCM2], 複層仕上塗材(防水形複層塗材E)[E], 浸透性吸水防止剤(シラン系)[S], ブランク[B]		

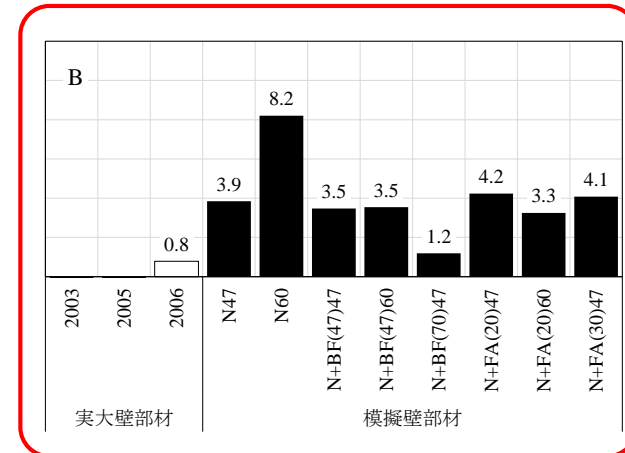
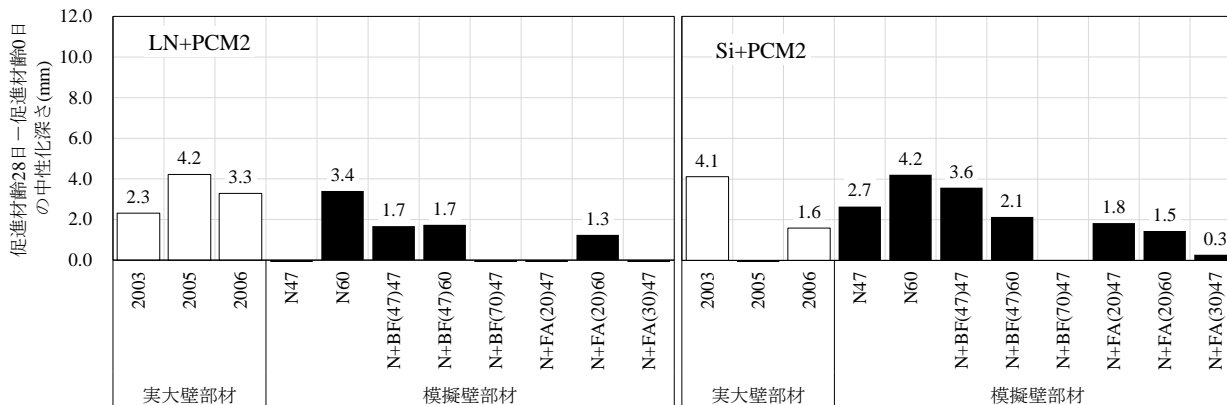
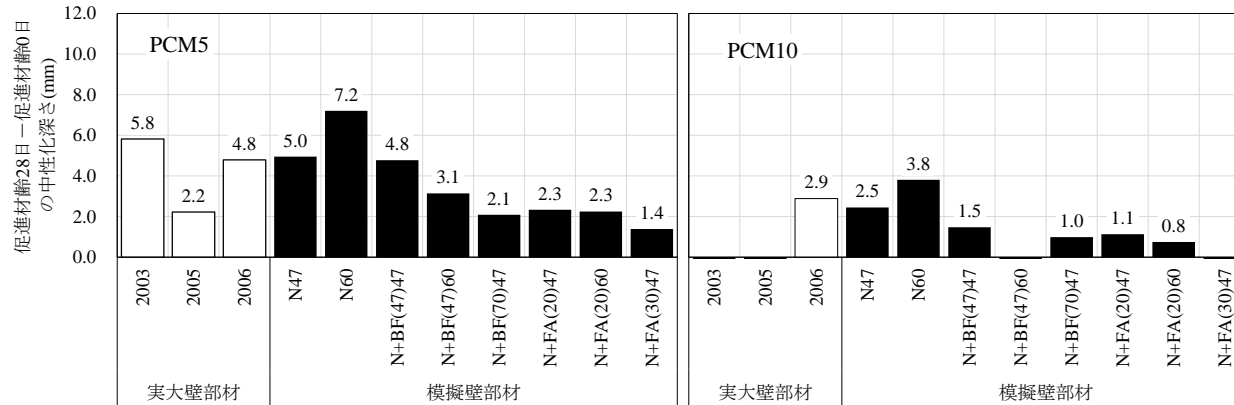
➤ a. 中性化抑制効果に関する検討(仕上材の組合せ)

表 新たに施す仕上材の組合せ

試験体の種類	既に施された仕上材		新たに施す仕上材
模擬壁部材 実大壁部材	仕上材無し		PCM5, PCM10, LN+PCM2, Si+PCM2, E, S, B
試験体	表面被覆材	リシン(無機系), マスチック(合成樹脂エマルジョン系)	E
	浸透性 吸水防止剤	シラン系(アルキルアルコキシシラン), シリコーン系(シリコーン), アクリル系(アクリル酸エステル樹脂), 無機系(アルカリ金属塩化物)	
	仕上材無し	透水型枠(微細孔フィルム), 塗装合板	

➤ a. 中性化抑制効果に関する検討(促進中性化試験結果)

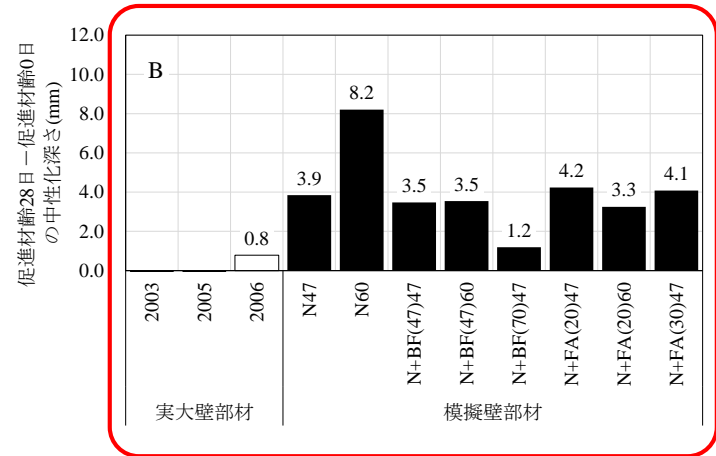
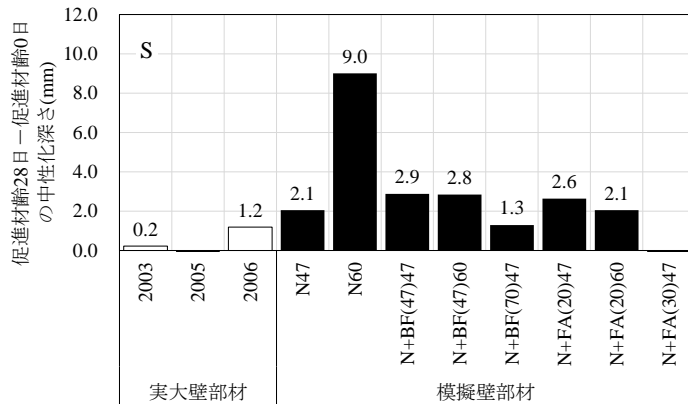
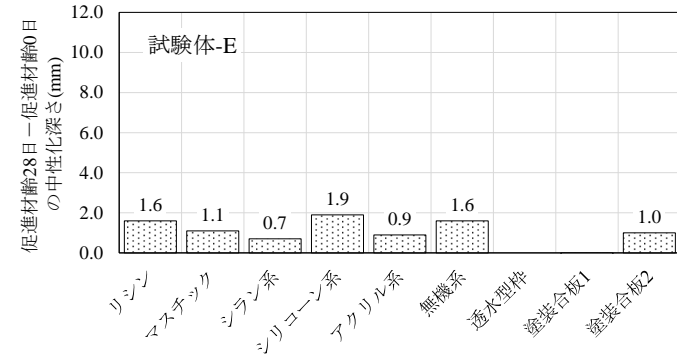
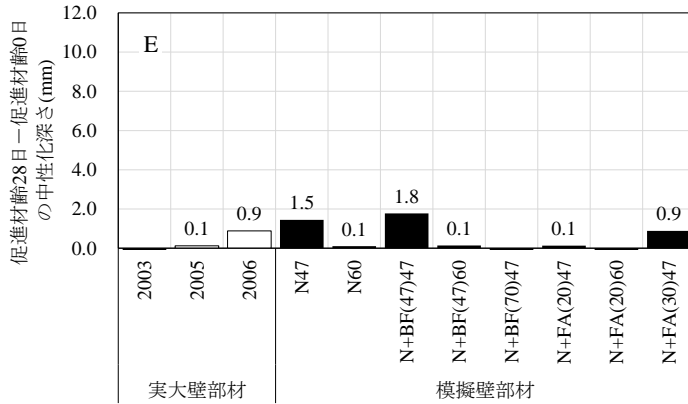
■セメント系仕上材を施したコンクリート



- ・ PCM5については中性化抑制効果はみられなかった
- ・ PCM10については、中性化抑制効果がPCM5より高かった
- ・ ケイ酸塩系PCM2および亜硝酸PCM2は厚さが2mmながら、中性化抑制効果は高かった

➤ a. 中性化抑制効果に関する検討(促進中性化試験結果)

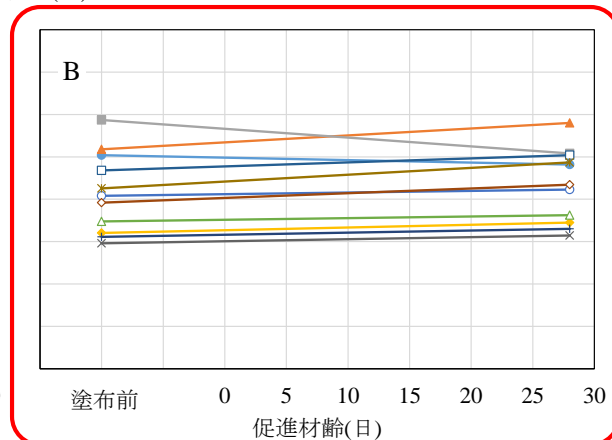
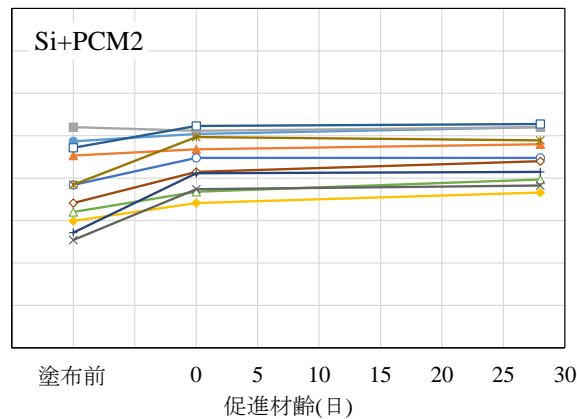
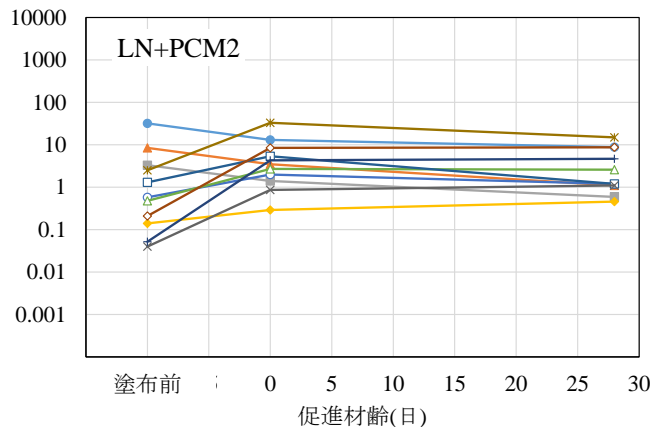
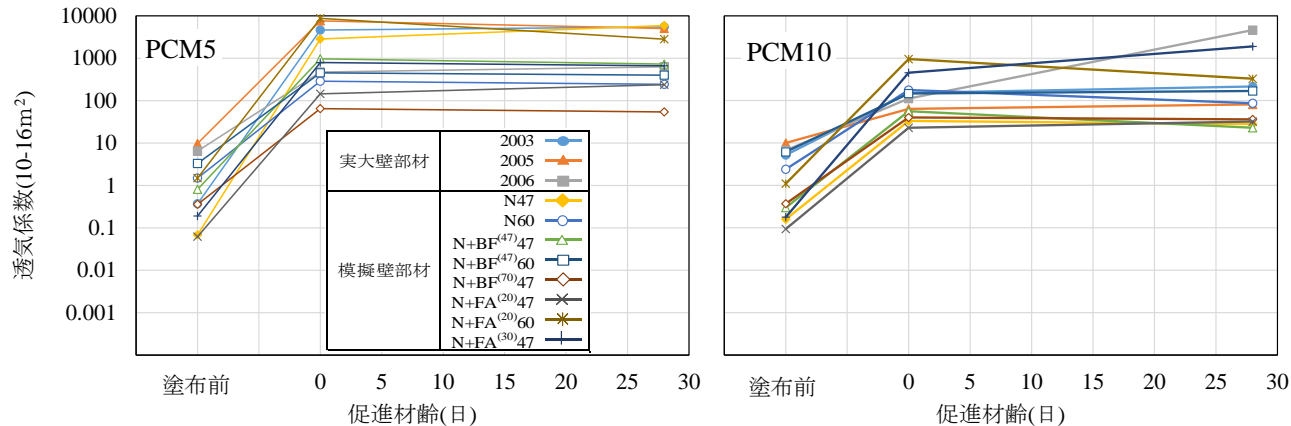
■ 非セメント系仕上材を施したコンクリート



- ・ 複層仕上塗材は今回用いた仕上材の中で最も中性化抑制効果が高かった
- ・ 浸透性吸水防止剤(シラン系)は中性化抑制効果が期待できない

➤ a. 中性化抑制効果に関する検討 (透気試験結果)

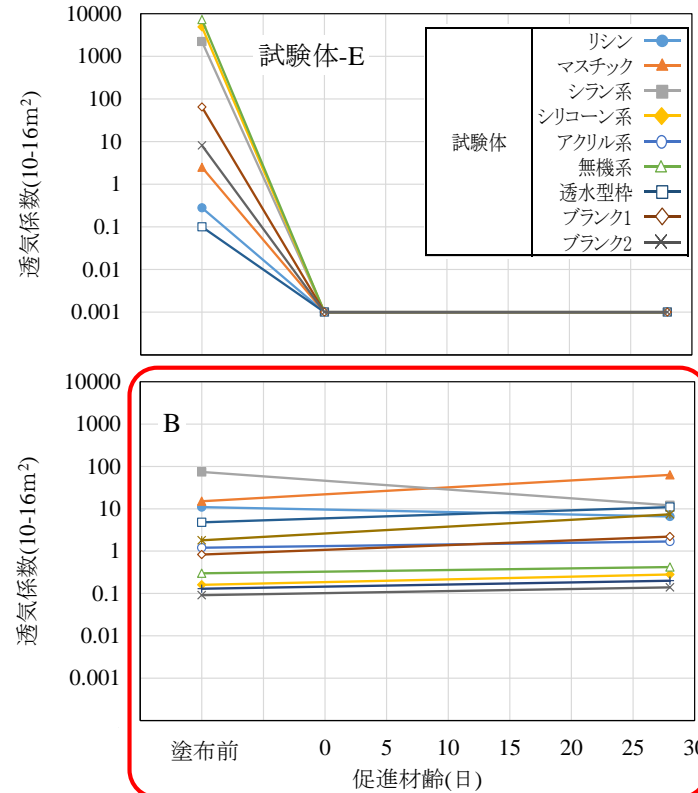
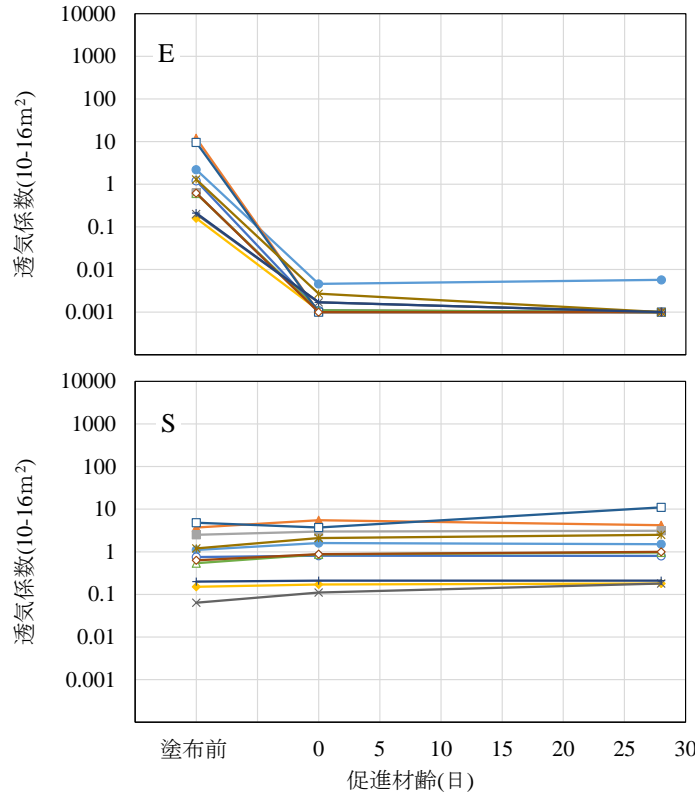
■ セメント系仕上材を施したコンクリート



- ・ PCM5およびPCM10は、透気係数が大きくなる傾向を示した。これは、表面に出来た微細なひび割れが原因と考えられる
- ・ ケイ酸塩系PCM2および亜硝酸PCM2は、ベースコンクリートに依存する。

➤ a. 中性化抑制効果に関する検討 (透気試験結果)

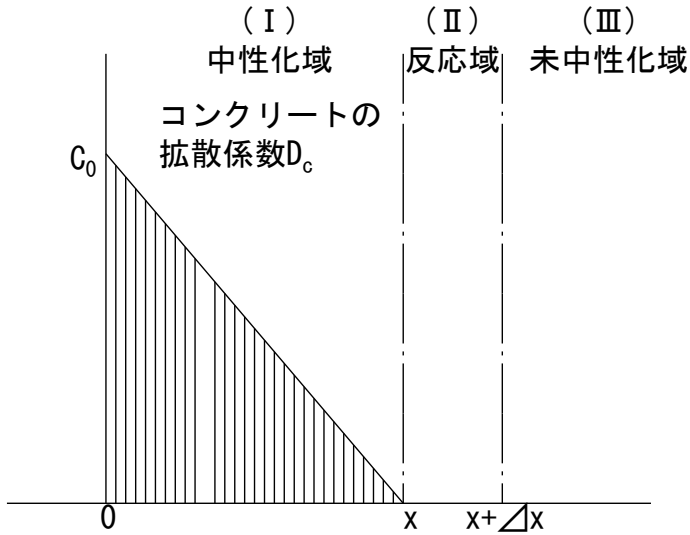
■ 非セメント系仕上材を施したコンクリート



- ・ 複層仕上材塗材は、いずれのコンクリートに塗布しても透気係数は**極めて小さくなる**傾向を示した。
- ・ 浸透性吸水防止剤(シラン系)は、ブランクと**ほぼ同程度**の透気係数となった。

➤ a. 中性化抑制効果に関する検討(中性化予測モデル)

【仕上材がない場合】

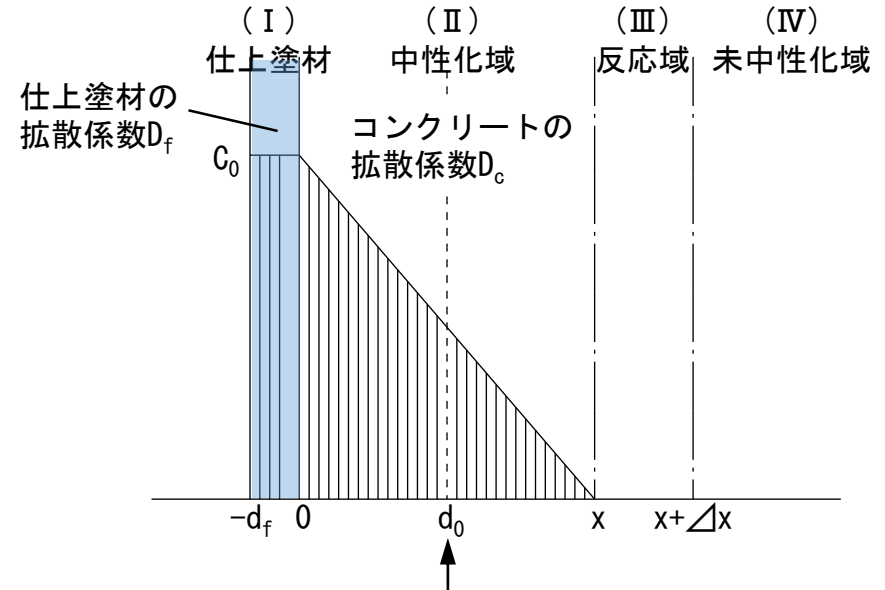


$$x = A\sqrt{t}$$

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

t : 時間(週)

【仕上塗材を塗布した場合】



促進中性化試験開始時に既に中性化していた深さ

$$x = A_5 \left\{ \sqrt{t + \left(\frac{d_0}{A_5} + R_{5f} \right)^2} - R_{5f} \right\}$$

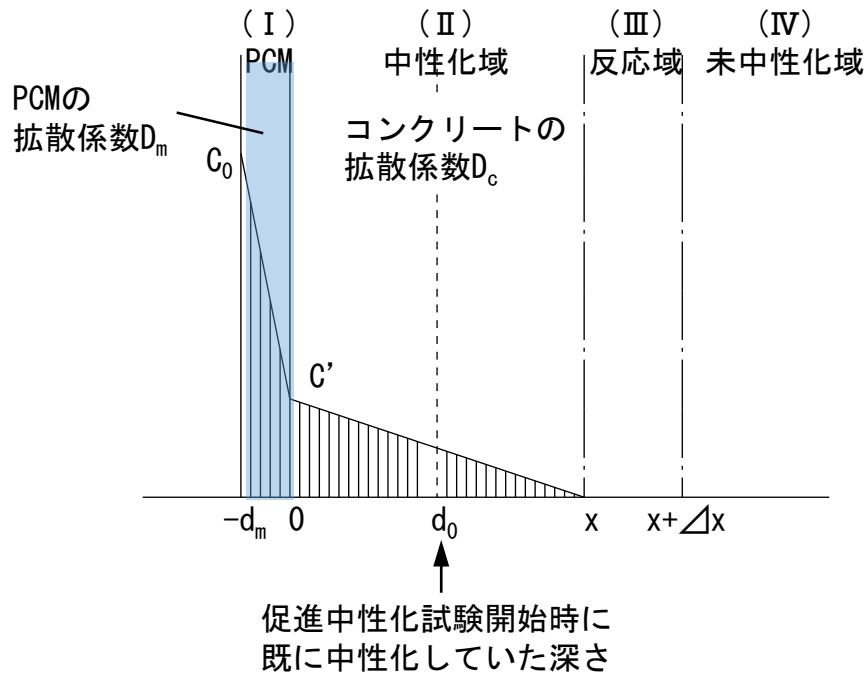
$$R_{5f} = \frac{d_f}{D_f} \cdot \frac{D_c}{A_5}$$

A_5 : コンクリートの中性化速度係数($mm/\sqrt{\text{週}}$)

R_{5f} : 仕上塗材の中性化抵抗($\sqrt{\text{週}}$)

➤ a. 中性化抑制効果に関する検討(中性化予測モデル)

【PCMを塗布した場合】



(1) PCMの中性化が進行している期間

$$x = A_{5m}\sqrt{t} - d_m$$

(2) PCMが全て中性化する期間

$$t_m = \left(\frac{d_m}{A_{5m}} \right)^2$$

(3) PCMが全て中性化した後, コンクリート
の中性化が進行している期間

$$x = A_5 \left\{ \sqrt{t - \left(\frac{d_m}{A_{5m}} \right)^2 + \left(\frac{d_0}{A_5} + R_{5m} \right)^2} - R_{5m} \right\}$$

$$R_{5m} = \frac{d_m}{D_m} \cdot \frac{D_c}{A_{5m}}$$

A_{5m} : PCMの中性化速度係数 ($mm/\sqrt{\text{週}}$)

R_{5m} : PCMの中性化抵抗 ($\sqrt{\text{週}}$)

➤ a. 中性化抑制効果に関する検討(中性化予測モデル)

■ 中性化抵抗の算出

本検討では、促進中性化結果のばらつきが大きいいため、暴露データより算出したCO₂濃度が5%の場合の中性化速度係数を用いることとした。

表 中性化速度係数一覧

対象構造物	結合材の種類	作製年(年)	暴露		促進中性化
			A _{0.05}	A ₅	A ₅
			(mm/√年)	(mm/√週)	(mm/√週)
実大壁部材	N53.5	2003	5.338	7.402	-
		2005	5.744	7.965	-
		2006	5.180	7.183	2.567
模擬壁部材	N47	2014	2.468	3.423	3.032
	N60		5.882	8.157	6.687
	N+BF ⁽⁴⁵⁾ 47		2.966	4.113	2.995
	N+BF ⁽⁴⁵⁾ 60		8.971	12.440	4.635
	N+BF ⁽⁷⁰⁾ 47		6.589	9.137	2.211
	N+FA ⁽²⁰⁾ 47		3.782	5.244	3.704
	N+FA ⁽²⁰⁾ 60		8.704	12.070	4.356
	N+FA ⁽³⁰⁾ 47		6.596	9.147	4.441

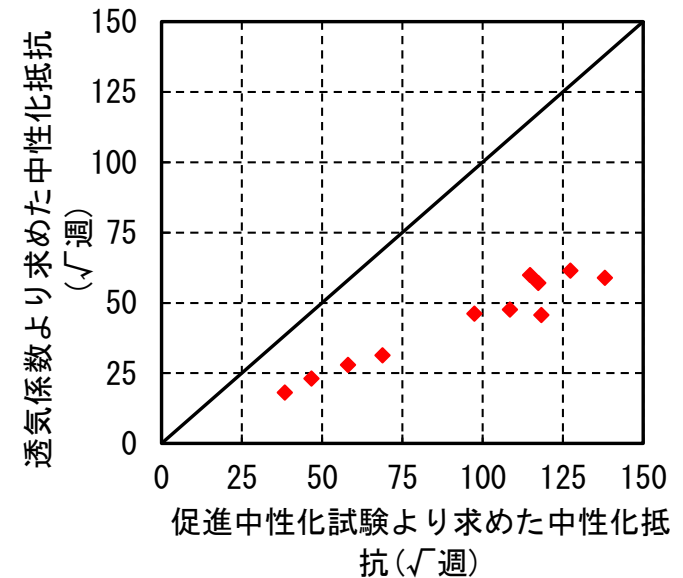


図 透気係数による中性化抵抗と促進中性化試験による中性化抵抗の比較

- ・ 透気試験より求めた中性化抵抗と、促進中性化試験より求めた中性化抵抗を比較した場合、全体的に透気係数より算出した中性化抵抗の方が小さくなる傾向を示した

➤ a. 中性化抑制効果に関する検討(中性化予測モデル)

■ 中性化予測モデル

普通ポルトランドセメント使用，W/C=55%の建築物を想定し表に示す算定条件のもと，中性化進行の予測を行った。

表 中性化予測モデルの算定条件

仕上塗材	中性化速度係数A (mm/√年)	PCMの中性化速度係数A _m (mm/√年)	中性化抵抗R (√年)
複層仕上塗材	2.92	-	150.48
浸透性吸水防止剤		-	11.81
PCM厚さ5mm		4.36	5.21
PCM厚さ10mm		4.36	13.25
亜硝酸添加PCM厚さ2mm		1.81	29.57
ケイ酸塩系PCM厚さ2mm		3.14	9.41

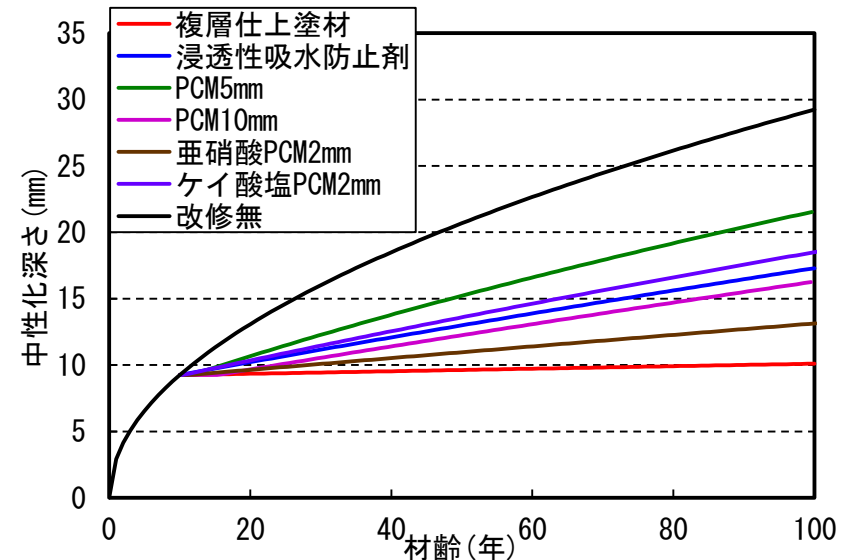


図 中性化進行予測(築10年で改修)

- ・ 築10年後に改修を行った場合，PCM厚さ5mmおよびケイ酸塩系PCM厚さ2mm以外は，築100年後の中性化深さが国土交通省告示第293号の増改築基準の18mm以下になる
- ・ 各種仕上材を施した改修の時期と方法については，中性化抵抗を用いた中性化進行予測により評価できる

➤ b. 鉄筋腐食抑制効果に関する検討(実験概要)

■ 要因と水準

表 要因と水準

結合材の種類	普通ポルトランドセメント[N]
水結合材比	53.5%
試験体の種類	実大壁部材
作製年	2003年, 2005年, 2006年
既に施された仕上材	仕上材無し
新たに施す仕上材	複層仕上塗材(防水形複層塗材E) [E], 浸透性吸水防止剤(シラン系) [S], 浸透性吸水防止剤(ケイ酸塩系) [K], ブランク [B]
養生方法	屋外暴露(雨掛かりなし) 恒温恒湿室養生 常時湿潤養生 乾湿繰り返し養生

■ 新たに施す仕上材の概要

表 新たに施す仕上材の概要

仕上材の種類	概要
E	高弾性アクリルゴム系壁面防水化粧材
S	主成分：アルキルメトキシシラン系, 有効成分：100%, 触媒：無
K	主成分：ケイ酸ナトリウム(含有量60~80%) pH：11.3~12.3, 密度：1.240~1.280g/cm ³

- ・ なお、今回の実験に用いたエポキシ樹脂は吸水性があるため、常時湿潤養生および乾湿繰り返し養生の相対含水率の補正を下記式を用いて行った

$$\frac{E \text{ の各材齢(2, 4, 7, 14, 28, 56日)の質量} - E \text{ の0日の質量}}{E \text{ のエポキシ樹脂塗布面積}} = \text{各材齢のエポキシ樹脂の吸水量}$$

➤ b. 鉄筋腐食抑制効果に関する検討(養生条件)

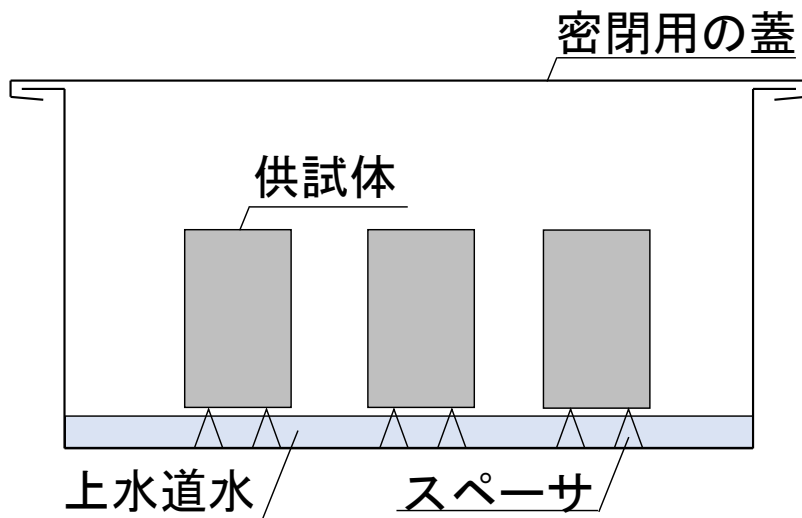
■ 屋外暴露(雨掛かりなし)



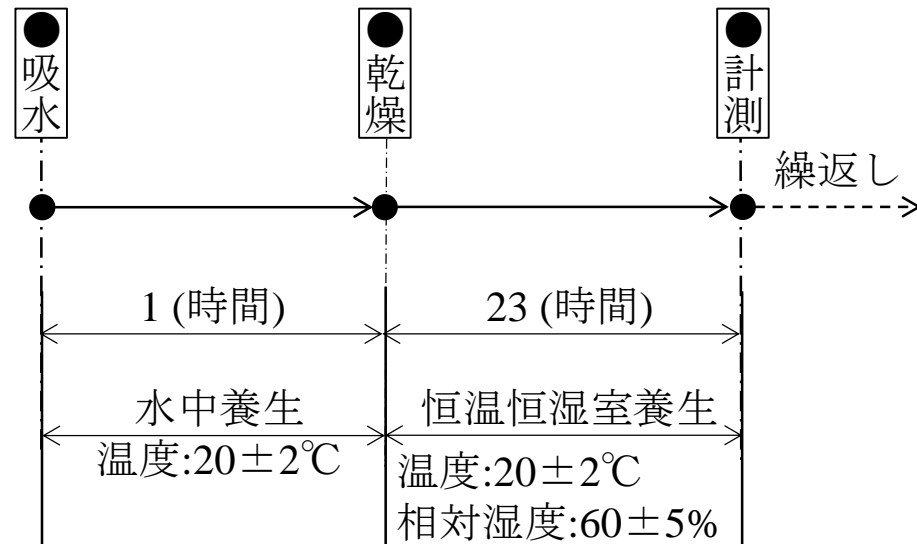
■ 恒温恒湿室養生



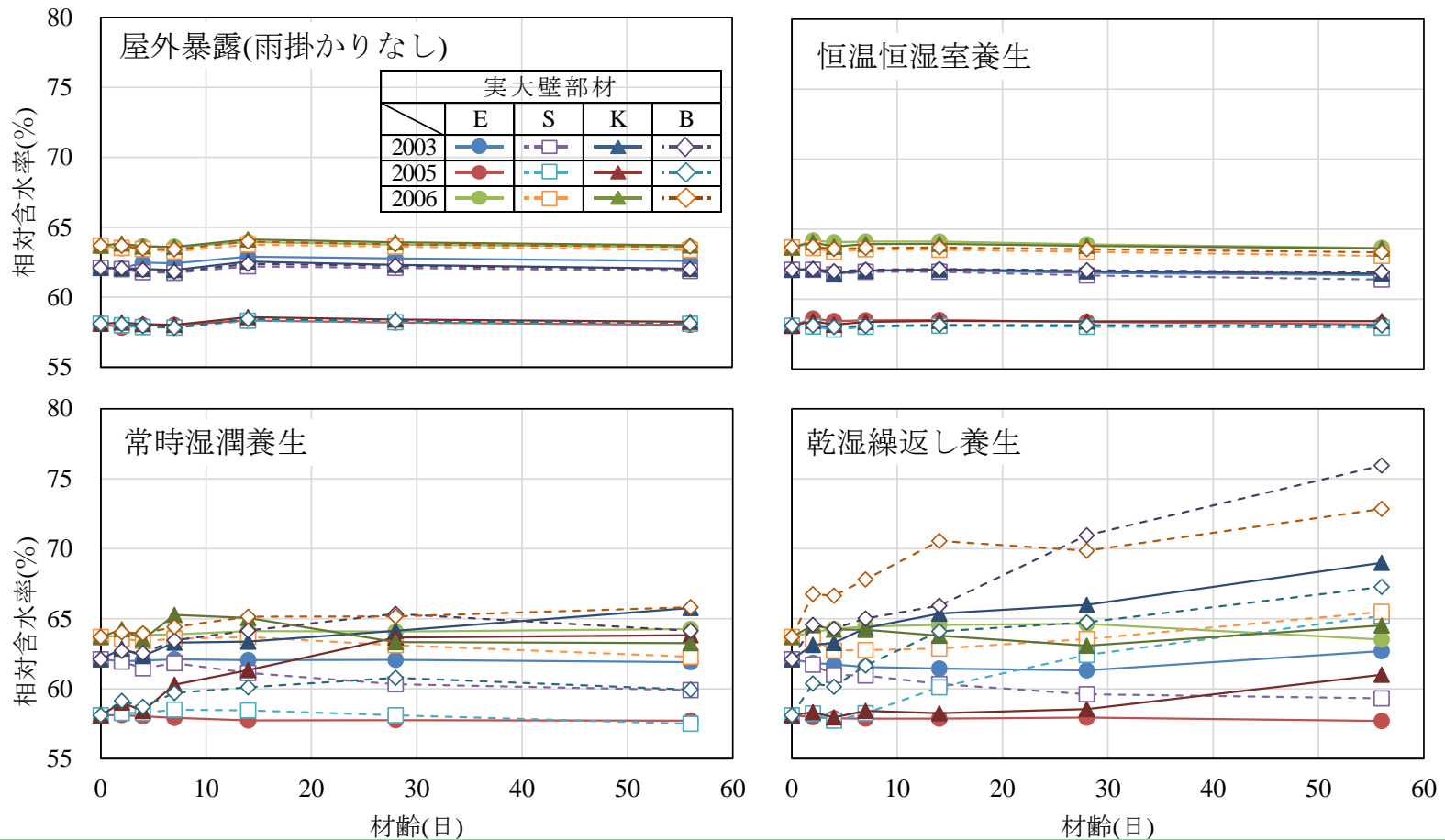
■ 常時湿潤養生



■ 乾湿繰返し養生



➤ b. 鉄筋腐食抑制効果に関する検討 (相対含水率の変化)



- ・ **複層仕上塗材**は、含水率の変化が見られなかった
- ・ **ケイ酸塩系**は、常時湿潤および乾湿繰返し養生において相対含水率が増加した
- ・ **シラン系**は、最も相対含水率の増加を抑制でき、常時湿潤養生においては、相対含水率が減少した

➤c. 中性化調査方法の精度と代表性 (調査概要)

■ 調査の目的

既存鉄筋コンクリート構造物の中性化について、耐震診断や耐震補強を目的とした実態調査の中性化深さのデータから、同一建築物における中性化深さのばらつきと採取方位が中性化進行速度に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした

表 対象物件の概要

項目		水準		
建築物用途		学校関係施設	主として民間の集合住宅	公的な集合住宅
建物数		397棟	82棟	981棟
竣工年		1953～1985年	1905～2006年	1964～1994年
試験時の材齢		17～52年	6～73年	15～44年
設計基準強度		13.5～21N/mm ²	18～27N/mm ²	16.5, 18, 21 (N/mm ²)
コア採取部位		壁, 柱, 梁	壁, 柱, 梁	地上に露出している基礎梁の上端部分
コア供試体の本数		5009件	708件	981件
採取方位ごとのデータ数	北面	395件	23件	140件
	東面	801件	35件	813件
	南面	380件	24件	7件
	西面	622件	23件	21件
	北東面	330件	3件	—
	北西面	241件	9件	—
	南東面	275件	18件	—
	南西面	353件	3件	—

➤c. 中性化調査方法の精度と代表性(ばらつき)

■ 中性化深さのばらつき

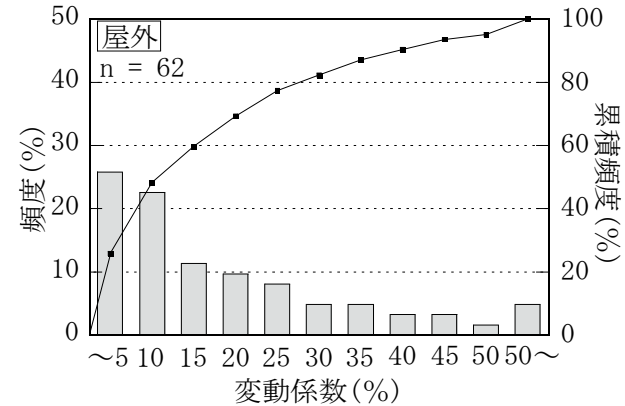
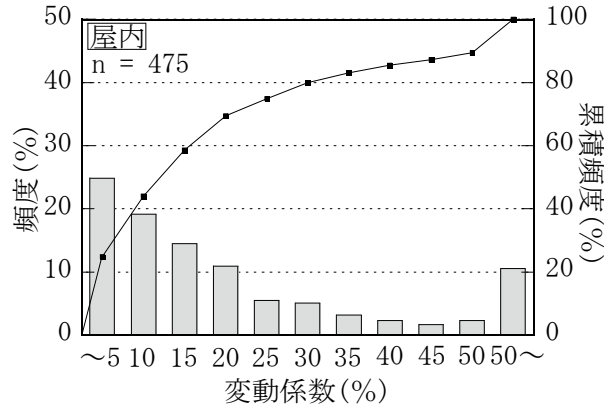


図 同一建築物における中性化深さの変動係数(学校関係施設)

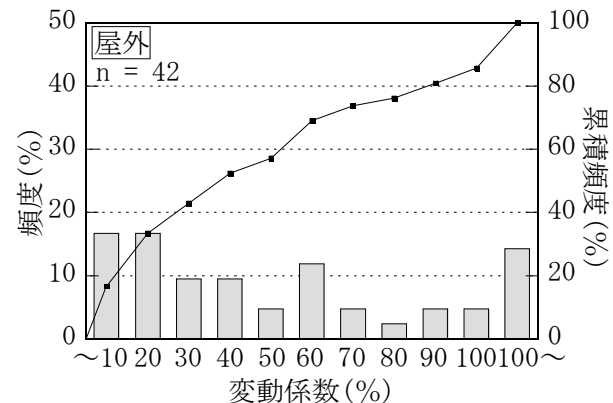
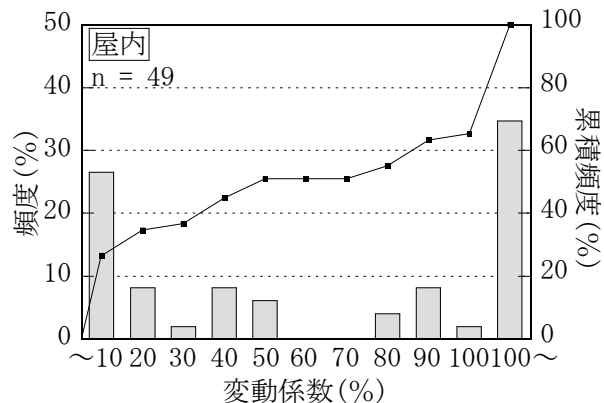


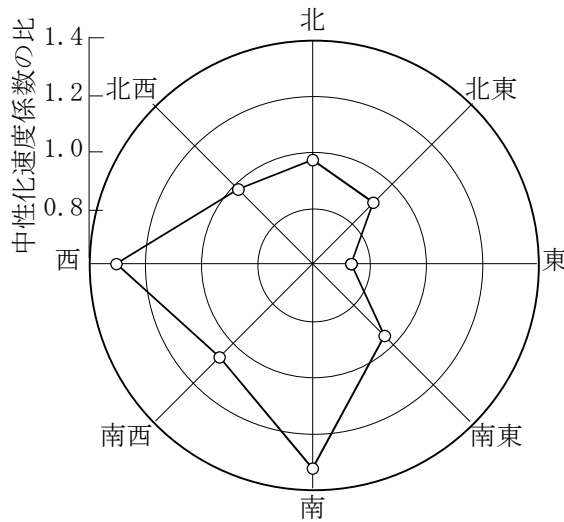
図 同一建築物における中性化深さの変動係数(民間の集合住宅)

- ・ 学校関係施設のばらつきは、**9割が変動係数50%以下**であり、小さかった
- ・ 民間の集合住宅のばらつきは大きく、**変動係数100%を超える**ものが複数あった

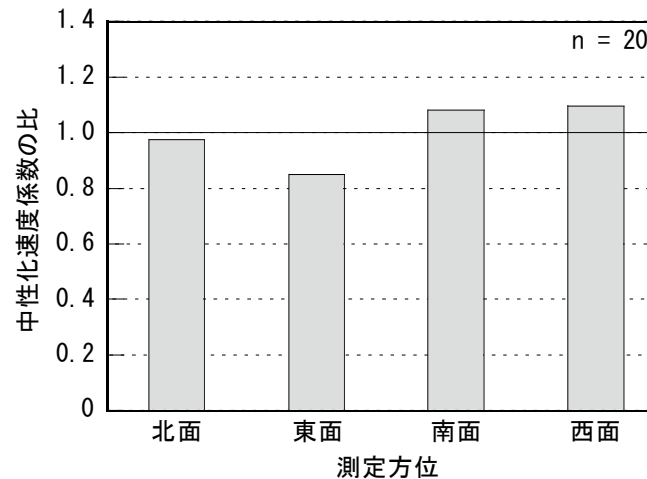
➤c. 中性化調査方法の精度と代表性(方位毎のばらつき)

■ 方位毎のばらつき

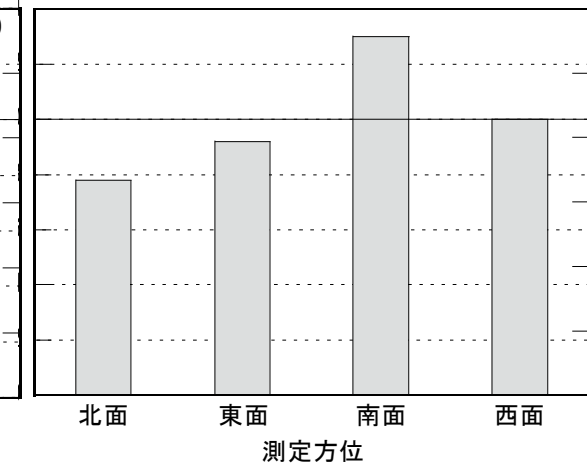
測定方位ごとの中性化速度係数を比較するために、ここでは、同一の建築物で、かつ同一の仕上材の箇所において、異なる2方位以上の中性化深さを測定しているデータに限定した。



学校関係施設



民間の集合住宅



公的な集合住宅

- 中性化速度係数は、いずれの建物の用途においても、南面、西面、北面、東面の順で大きい傾向を示し、南面が北面の約1.1~1.7倍であり、西面が北面の約1.1~1.35倍であった。

➤d. 劣化現象の評価方法の検証(調査概要)

■調査概要

ここでは、既往の学協会の指針類について顕在化している劣化現象に対し、ひび割れ、中性化および塩害について、事前対策、調査方法、原因推定、評価および事後の対策の観点から各指針類を俯瞰してまとめた。

表 文献一覧

文献	発刊	発行年
コンクリートのひび割れ調査, 補修・補強指針-2013- コンクリート診断技術' 15	日本コンクリート工学会	2013. 4. 1
鉄筋コンクリート造のひび割れ対策 (設計・施工)指針・同解説	日本建築学会	2002. 12. 25
建築物の調査・診断指針(案)・同解説	日本建築学会	2008. 3. 5
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	日本建築学会	1997. 1. 25
建設住宅性能評価解説 (既存住宅・現状検査)2014	全国官報販売協 同組合	2014. 5. 15

➤d. 劣化現象の評価方法の検証(まとめ)

■まとめ

1. ひび割れ

ひび割れについては、事前対策について記しているものは日本建築学会の指針類のみであり、日本コンクリート工学協会の指針類においては調査方法および事後対策が詳細に示されていた。

2. 中性化

中性化については、日本コンクリート工学協会においては評価および事後対策の選定するにあたり鉄筋の腐食グレードを用いていたが、日本建築学会においては、評価を中性化深さで行い、事後対策は回復目標グレードを用いていた。

3. 塩害

塩害については、日本建築学会の指針類には事前対策のみ記されていた。日本コンクリート工学協会の指針類については、塩害の調査方法、原因推定、評価および事後対策について示されていた。

➤まとめ

■仕上材を新たに施した後の中性化抑制効果に関する検討

- ・ 拡散理論に基づき算出した中性化抵抗および促進中性化試験を用いた中性化進行予測により、**各種仕上材を施した場合の中性化抑制効果を評価**できる。
- ・ 透気係数による中性化抵抗と促進中性化試験による中性化抵抗を比較した場合、透気係数による中性化抵抗が小さくなる傾向を示した。

■仕上材を新たに施した後の鉄筋腐食抑制効果に関する検討

- ・ 浸透性吸水防止剤(シラン系)は、**最も相対含水率の増加を抑制できる**傾向を示した。また、常時湿潤においては、相対含水率が減少した。

▶まとめ

■中性化調査方法の精度と調査結果の代表性の評価方法基準に関する調査

- ・ 中性化速度は、いずれの建物の用途においても、南面、西面、北面、東面の順で大きい傾向を示し、**南面が北面の約1.1~1.7倍**であり、**西面が北面の約1.1~1.35倍**であった。

■仕上材を新たに施した後の鉄筋腐食抑制効果に関する検討

- ・ 顕在化した劣化現象について各種調査診断が提案されており、適用するにあたってはそれぞれ適切な指針等を参照すると良い。

今回の検討によって得られた各仕上材を施した後の中性化予測モデルを用いて、実験結果の積み重ねにおいて**等級の分類分けができる**ことが確認された。