

11. 変色した屋上床コンクリートの物性に関する調査

Examination about Properties of Discolored Roof Floor Concrete

立松 和彦*

山崎 順二*

要 旨

建設後18年を経過した建物の屋上駐車場において、床コンクリートが淡い黄土色に変色した。変色部は、表面の劣化状況から比較的平滑なゾーンA、および表層に骨材の露出が認められるゾーンBの2種類に大別でき、変色の深さはゾーンAが約5mm、ゾーンBが約25mmと両者に大きな差が認められた。この差の原因および変色の原因を追求するために、両者のコンクリートの圧縮強度、表面強度、表面温度、示差熱分析、粉末X線回折、細孔径分布および塩化物量について試験を行った。その結果、本来は安定しているはずのセメント水和物（ケイ酸カルシウム水和物）が、変色部では炭酸化によって分解していることが確認できた。また、変色深さの差については、施工条件、環境条件の差異、および塩分の濃縮が炭酸化を促進させたために生じたものと推測された。

キーワード：変色／炭酸化／中性化／炭酸カルシウム／水酸化カルシウム／塩分の濃縮

1. はじめに

昨今、高架橋からコンクリート片が落下するなど、コンクリートの早期劣化に関する問題が改めて世間の耳目を集めている。例えば山陽新幹線においては、一部で鉄筋の腐食がかなり進行し、床版などでは構造的な危険性を指摘¹⁾²⁾される状況に至っている。その原因として塩害やアルカリ骨材反応などの要因もあげられているが、中性化が異常に早いことが早期劣化の主因となっており、中性化による鉄筋腐食を塩害が加速している³⁾との見解も出されている。これらのことから、コンクリートの劣化は中性化（炭酸化）現象が大きな役割を占めていることがわかる。

中性化（炭酸化）に関する研究は、岸谷⁴⁾、白山⁵⁾、依田⁶⁾をはじめとして数多くの研究がなされている。近年では、炭酸化によるセメント水和物の分解や、炭酸化による変色現象など、従来にはみられなかった事例も報告⁷⁾⁸⁾されている。しかし、この変色現象に関する詳細な研究はあまり見られない。本報告は、コンクリートが変色した事例について、その物性の変化を調査し、変色の原因等の推察を行ったものである。



写真-1 床面の変色状況（ゾーンA）



写真-2 床面の劣化状況の違い

が淡い黄土色（straw yellowのやや明るい色；和名の練り色、鳥の子色に近い）に変色し、かつ表面の劣化も認められたので、コアを採取して調査を行なった。床表面

2. 試験概要

2.1 変色深さ

建設後18年を経過した商業ビル（所在地：福岡市）の、屋上駐車場の床コンクリート（防水押さえコンクリート）

*建築工法・材料研究室

表-1 変色深さ

測定位置	ゾーンA		ゾーンB	
	コア1	コア2	コア3	コア4
変色深さ(mm)	4.3	3～7	27.0	20～25

※コア1,3は中性化深さ測定後に測定(6点の平均)した。
コア2,4は圧縮試験後の試料片で測定した。

の劣化状況の違いから、比較的平滑なゾーンAおよび表層モルタルが剥離し骨材が露出しているゾーンBに区分できたので、それぞれから2本ずつ計4本のコア試料(直径約75mm)を採取した。ゾーンAの床面の状況を写真-1に、ゾーンAとゾーンBの床表面の劣化状況の違いを写真-2に示す。変色深さは、表-1に示すように、床表面から深さ方向にゾーンAで約5mm、ゾーンBで約25mmであった。これは、排気ガスの影響あるいは炭酸化¹⁾によって、硬化コンクリート中のC-S-H水和物(ケイ酸カルシウム水和物)が分解され、変色を生じたのではないかと推測された。そこで、両者のコンクリートの物性比較および変色の原因などについて検討するために、後述する諸物性の試験を行った。検討のポイントは、次の2点である。

- ①床面の劣化状態(中性化深さ・変色深さ・表面の状態)がゾーンにより大きく異なるのはなぜか？
- ②通常の中性化ではなく、変色現象を伴う炭酸化が生じたのはなぜか？

2.2 試験項目および試験方法

コア試料は、ゾーンAからコア1およびコア2を、ゾーンBからコア3およびコア4を採取した。試験項目は、中性化深さ、圧縮強度、表面強度、表面温度、示差熱分析、粉末X線回折、細孔径分布、塩化物量とした。表面強度および表面温度については現地の床面における調査である。表-2に、各コア試料ごとに実施した試験項目を示す。表-3に試験方法を、図-1に試験の流れおよび試料区分の概要を示す。

中性化深さは、コア1およびコア3で測定した。試薬の噴霧によって、床表面から赤紫色に呈色した部分までの深さを、約10mm間隔で6点測定し、その平均値を中性化深さとした。

圧縮強度試験は、コア2およびコア4で実施した。試験体の高さ(h)と直径(d)の比による補正は、JIS A 1107によって行った。

示差熱分析試験は、圧縮試験後のコア4を用いて行った。床表面から深さ方向に約20mmごとにスライスしたものを試料とし、その一部(コア4の4-1、4-3)につい

表-2 コアの試料区分

	ゾーンA		ゾーンB	
	コア1	コア2	コア3	コア4
中性化深さ	○1	—	○1	—
圧縮強度	—	○1	—	○1
示差熱分析	—	—	—	○2
粉末X線回折	—	○3	—	○4
細孔径分布	○2	—	○6	—
塩化物量	—	○3	—	○4

○：実施 数字は測定試料数

表-3 試験方法

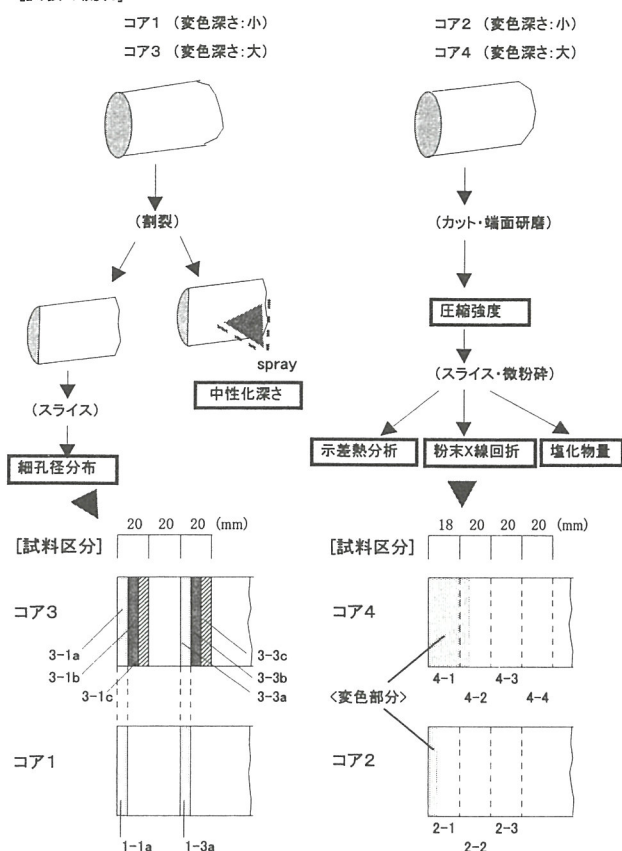
試験項目	試験方法
中性化深さ	コア試料の割裂面にフェノールフタレイン1%アルコール溶液を噴霧し、変色しない深さを測定
コアの圧縮強度	コア試料の長さができるだけ長くなるように切断後、両端面を研磨してJIS A 1108に準じた試験を実施
床面の表面強度	NR型シュミットハンマーにより1ヵ所あたり20点測定
床面の表面温度	赤外線放射温度計により測定
示差熱分析	炭酸カルシウムおよび水酸化カルシウムを示差熱分析試験装置[ロボットTG/DTA RTG 220(SII社製)]により定量分析
粉末X線回折	粉末X線回折装置[XRD-6000(島津製作所製)]による定性分析(管球Cu,40kV-40mA)
細孔径分布	3-5mm角の試料を水銀圧入式ポロシメータ(Pascal 140/440(CE Instruments社製))により半径1.5nm～10μmの細孔を測定
塩化物イオン量	塩素イオン選択性電極を用いた電位差滴定法による全塩分定量分析

て測定した。試料4-1は、ほぼ全域が変色部であり、試料4-3は非変色部である。

粉末X線回折試験は、示差熱分析と同様に、スライス試料を微粉碎したものをを用いて行った。コア2では深さ方向に2-1、2-2、2-3の3試料について測定し、コア4では4-1、4-2、4-3、4-4の4試料について測定した。

細孔径分布は、コア1およびコア3で測定した。中性化深さの測定で割裂した試料のうち、試薬を噴霧しなかったものから試料を採取した。深さ方向に約20mmごとにゾーンを-1、-2、-3と区分し、さらにそのゾーン内を深さ方向にa、b、cと3区分した。変色深さが27.0mmのコア3では、そのゾーン1から試料3-1a、3-1b、3-1cを、ゾーン3から試料3-3a、3-3b、3-3cを採取した(図-1)。それをサイコロ状に成形し、試験に供した。変色深さが4.3mmのコア1からは、1-1aおよび1-3aの試料を採取した。

【試験の流れ】



図－1 試験の流れおよび試料区分

変色部に相当する試料は、試料3-1a, 3-1b, 3-1c, および試料1-1aである。

塩化物量は、コア 2 およびコア 4 で測定した。コア 2 では深さ方向に2-1, 2-2, 2-3の3試料を測定し、コア 4 では同様に4-1, 4-2, 4-3, 4-4の4試料を測定した。

床面の表面強度は、ゾーン A とゾーン B の比較、および変色部と非変色部の比較ができるように測定した。

表面温度は、原則として表面強度の測定点付近で測定した。

2.3 屋上の状況など

コア採取位置の状況は、コア 1 およびコア 2 はともにほぼ一日中日かげとなる部分であり、コア 3 およびコア 4 はともに駐車車両がなければほぼ一日中日射を受ける部分である。なお、コアを採取した位置は、雨水が滞留する場所ではない。そのほか、豆砂利コンクリート（粗骨材最大寸法13mm程度）を使用していること、海砂を使用（貝殻が認められた）していることが確認できた。また、車のタイヤによる摩耗も劣化要因の一つと考えられたが、車の昇降口から遠いゾーン B の表面の方が劣化が激しいことから、摩耗の影響は主要因ではないと判断した。さらに、ゾーン A とゾーン B は、最も水上の部分



写真－3 コア3（中性化深さ測定後）

表－4 中性化深さ

測定位置	コア1	コア3
中性化深さ(mm)	4.6	28.2

の目地で明確に区分できたことから、両者はコンクリートの打設日が異なると考えられた。写真－2の中央の目地から左がゾーン A、右がゾーン B である。

3. 試験結果および考察

3.1 中性化深さ

中性化深さの測定結果を表－4に、中性化深さ測定後のコア 3 の状況を写真－1に示す。淡い黄土色に変色した部分はフェノールフタレインで呈色せず、変色部の深さと中性化深さはほぼ一致していた（表－1参照）。コア 1 とコア 3 のコンクリートそのものは、打設日が異なっても同一の材料を用いているので大差はないはずであるが、両者の中性化深さは大きく異なっていた。

そこで、依田式⁶⁾を用いて18年経過時の中性化深さを計算してみた。変色部は防水押さえのコンクリートであるので、その呼び強度を180（当時）とすると水セメント比は64％程度になるので、中性化深さC(mm)と、材齢t(年)、品質係数 α との関係は、 $t=0.228 \times \alpha C^2$ と表せる。品質係数 α の値はコンクリートの締固め程度などにより変化し、依田⁶⁾は、施工程度などによって1.0(優), 0.75(良), 0.5(普通), 0.25(劣)と4段階の値を与えている。すなわち、施工程度によって、中性化深さには約2倍の差が生じることになり、材齢18年 ($t=18$) では、

$$\alpha=1.0 \text{ とすると } C_{\alpha=1.0}=8.9 \text{ (mm)},$$

$$\alpha=0.25 \text{ とすると } C_{\alpha=0.25}=17.8 \text{ (mm)} \text{ となる。}$$

しかし、今回の中性化深さの実測値は、コア 1 では $\alpha=1.0$ とした場合の計算値8.9mmよりも小さい4.6mmであるのに対し、コア 3 では $\alpha=0.25$ とした場合の計算値17.8

mmよりも大きい28.2mmであり、コア1の約6倍の値であった。この結果からみると、施工程度などの差だけでゾーンAとゾーンBの中性化深さが異なったとは考えにくい。何か別の要因が複合して、6倍もの差になったとする方が妥当であると考えられる。また、中性化深さの小さなコア1も大きなコア3も、ともに変色部の深さと中性化深さはほぼ一致していたことから、変色は中性化がある程度進行してから生じたのではなく、初期の段階から、中性化および変色が同時に進行したと推定される。松里らの研究⁹⁾でも、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の炭酸化とC-S-H水和物の炭酸化が同時に進行することを示唆する結果を示している。

3.2 圧縮強度

圧縮強度試験の結果を表-5に示す。建設年代から推測すると、躯体コンクリートの設計基準強度は 21N/mm^2 程度と考えられる。防水押さえコンクリートとしては、呼び強度180程度（当時）のコンクリートを打設していると推定され、コア2およびコア4の強度はともにほぼ妥当な数値であると考えられる。中性化深さの大きなコア4は、中性化深さの小さなコア2よりも約7%低い強度であったが、屋上の防水押さえコンクリートの強度としてはほぼ十分な強度を有していると考ええる。しかし、ゾーンAとゾーンBについては、コンクリートの打設日が異なっていた可能性があるため、単純に比較することは難しい。

中性化と圧縮強度との関係については、一般的には中性化しても圧縮強度は低下しないとされているが、丸山ら¹⁰⁾は、60年近く経過したRC橋から採取したコアの調査により、中性化が進行すれば圧縮強度は低下すると報告している。また、高田ら¹¹⁾、岡村ら¹²⁾、小林ら¹³⁾の研究でも、同様の研究成果が報告されている。今回のコア強度に関しても、中性化深さの大きなコア3およびコア4では、強度低下が生じているのではないかと考えられる。

表-5 圧縮強度

(強度はh/dによる補正後の値)

測定位置	高さh (mm)	直径d (mm)	圧縮強度 (N/mm^2)
コア 2	87.1	73.5	19.7
コア 4	87.1	73.5	18.3

3.3 示差熱分析および粉末X線回折

試料4-1、4-3中の水酸化カルシウム $\text{Ca}(\text{OH})_2$ および炭酸カルシウム CaCO_3 の含有量を、示差熱分析によって調

表-6 示差熱分析試験結果

(単位：重量%)

分析物	試料	試料4-1 (変色部)	試料4-3 (非変色部)
水酸化カルシウム $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$		(検出されず)	2.6
炭酸カルシウム $[\text{CaCO}_3]$		17.3	1.5

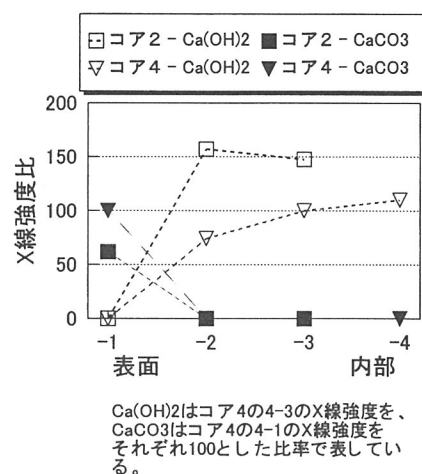
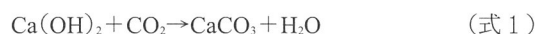


図-2 粉末X線回折による水酸化カルシウム $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ および炭酸カルシウム $[\text{CaCO}_3]$

べた結果を表-6に示す。

試料4-3（非変色部）では $\text{Ca}(\text{OH})_2$ と CaCO_3 がともに認められたが、試料4-1（変色部）では $\text{Ca}(\text{OH})_2$ は認められず、 CaCO_3 が17.3%と多量に認められた。試料4-3で、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ がすべて CaCO_3 に変化（式1）したとすると、 CaCO_3 の割合は約5.0%になるはずである。



しかし試料4-1での CaCO_3 の量は、その数値をはるかに上回る値であった。このことは、変色部のコンクリート中では $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 以外からも CaCO_3 が供給されていることを示しているといえる。小林¹⁾は、本来安定しているはずの硬化コンクリート中のC-S-H水和物が分解して CaCO_3 に変化すると指摘しており、今回のケースも同様の現象が生じたと推定される。

一方、粉末X線回折試験における、ある回折角度でのX線強度の比率によって、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ および CaCO_3 の量を相対比較したのが図-2である。 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ はコア4の4-3のX線強度を100とした比率で、 CaCO_3 はコア4の4-1のX線強度を100とした比率で表している。なお図-3に、

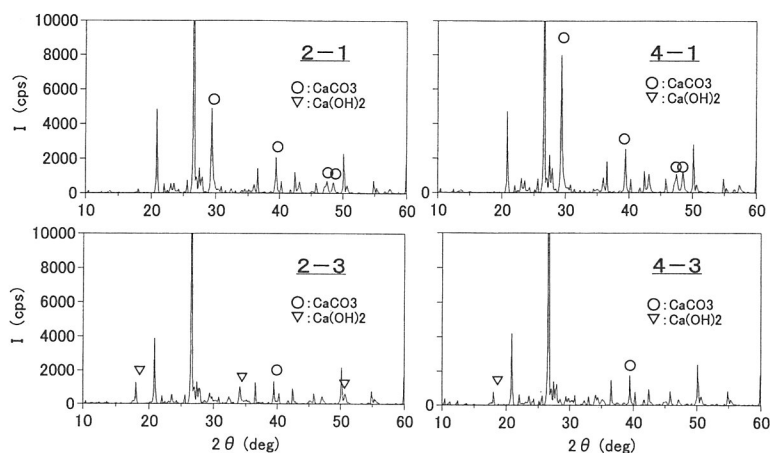


図-3 X線回折パターン

変色部の試料2-1, 4-1および非変色部の試料2-3, 4-3のX線回折パターンを示す。横軸が回折角度、縦軸がX線強度である。CaCO₃は表層部の試料（2-1, 4-1；いずれも変色部の試料）でともに認められたが、表層部以外の試料からは検出されなかった。逆に、Ca(OH)₂は表層部の試料（2-1, 4-1）では認められず、-2, -3, -4の内部の試料からのみ検出された。CaCO₃ ($2\theta = 29.4^\circ$)については、コア2はコア4よりも小さなX線強度比であった。コア2はコア1と同様に5mm程度の深さまで変色しているが、測定試料2-1（厚さ約20mm）でみれば変色部はその約1/4である。一方、コア4では測定試料4-1のほぼ全域が変色部である。その違いが、CaCO₃のX線強度比に表れていると考えられる。Ca(OH)₂ ($2\theta = 18.05^\circ$)については、表層部以外では各コアによってほぼ一定の値を示しているようであった。

佐々木ら¹⁴⁾は、低品質（経過年数に比べて中性化深さが大きい）と考えられるセメント硬化体を促進炭酸化させた結果、炭酸化による生成物中にCaCO₃の結晶の一種であるファテライト[vaterite]が確認されたと報告している（通常はカルサイト[calcite]が生成される）。今回のコア試料のうち、非変色部（未中性化部分）4-3, 4-4, 2-3の微粉砕試料を20℃、60%RH、CO₂濃度5%で約1カ月間促進中性化させたところ、ファテライトの特徴的なピーク（32.8°付近）と考えられるピークが新たに出現した。図-4中の、「2-3促進中性化」および「4-3促進中性化」がそれである。このことから、ゾーンA、Bとも、低品質な（分解しやすい）C-S-H水和物ができていたために変色を伴う炭酸化が生じたのではないかと推定できる。

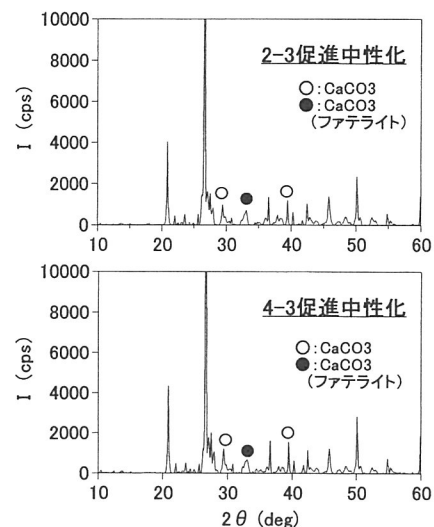


図-4 促進中性化によるファテライトの生成

3.4 細孔径分布

図-5に細孔径分布の測定結果を、表-7および図-6に各範囲ごとの細孔量の分布比率を示す。総細孔量で比較すると、コア3における変色部の3試料の平均は153.9 mm³/g、非変色部の3試料の平均は144.2 mm³/gと、顕著な差は認められなかった。しかし、その分布を検討すると、変色部（1-1a, 3-1a, 3-1b, 3-1c）では半径25nm以下の微細な細孔が非変色部（1-3a, 3-3a, 3-3b, 3-3c）と比較して約1/2に減少し、半径25nm～1μmの細孔が約2倍に増えていた。このことは、炭酸化によってセメント水和物が分解し、緻密であった部分がポーラス（多孔質）になったことを示している。一般的には、炭酸化によって細孔構造は緻密になり、概して小さな細孔が増加するという報告が多いが、今回の細孔構造の変化は正反対の現象を示している。既往の研究の中では、塚山¹⁵⁾が長期間屋外暴露したコンクリート供試体について行った実験結果と今回の実験結果は同じ傾向のものである。また、モルタルおよびコンクリートでは、圧縮強度は遷移帯の空隙に相当する直径50nm～2μm（半径25nm～1μm）の毛細管空隙量と高い相関を示す¹⁶⁾とされていることから、25nm～1μmの細孔が約2倍に増えていた変色部では圧縮強度が低下している可能性がある。

3.5 塩化物量

図-7に塩化物量の試験結果を示す。コア2およびコア4とも、変色部分より内部で塩分の濃縮が生じていることを示している。コア4の表層部では測定試料の厚さ約20mmがほぼすべて変色部であり、この部分の塩分はほぼ0であった。これは、炭酸化に伴って細孔構造がポー

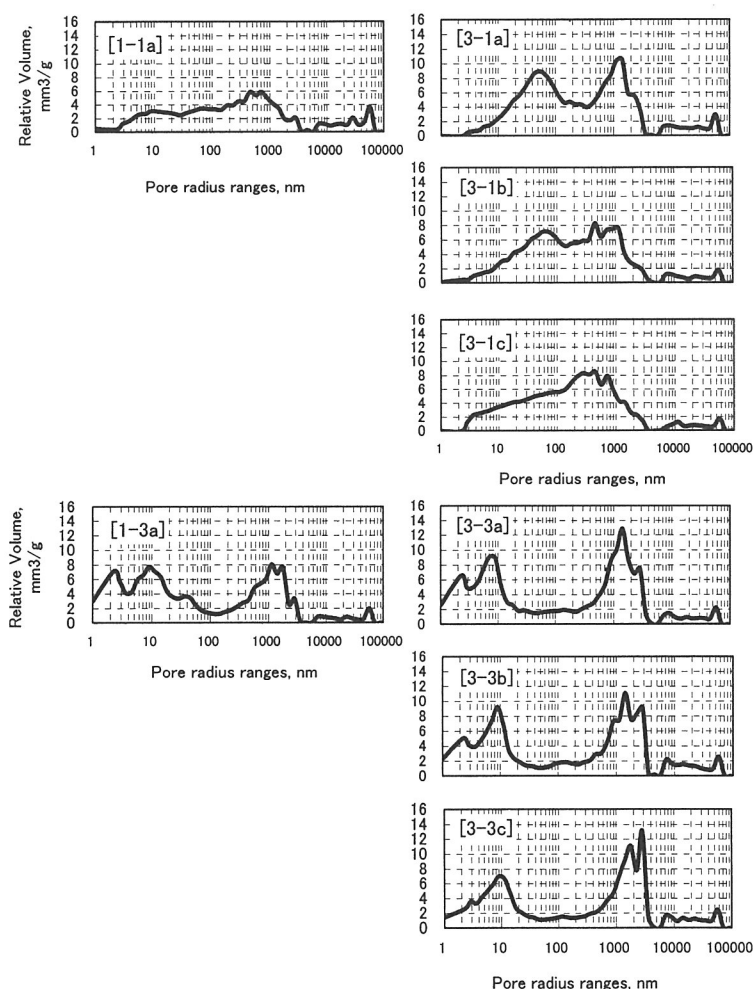


図-5 細孔径分布の測定結果

ラスになり、塩分の移動（内部への濃縮および外部への溶出・流出）がより容易になったためと考えられる。コア2においても、変色部ではコア4と同様に塩分はほぼ0であると推測されるが、コア2の表層部では約0.07%の塩分が検出されている。これは、測定試料の厚さ約20mmのうち変色部は約5mmであるため、その内部側に存在する濃縮された塩分が検出された結果であると考えられる。また、海砂から導入される塩化ナトリウムはコンクリートの中性を促進させる¹⁸⁾¹⁹⁾とされているので、今回の現象においても何らかの影響を及ぼしていると考えられる。

この建物が建設された当時（1981年[昭和56年]）の、建築工事に使用される細骨材中の許容塩分量は、NaCl換算で0.04%または条件付きで0.1%（JASS5 昭和54年版による）である。今回のコンクリートに用いられた海砂の塩分量が規制値の0.04%とすると、コンクリート中の塩化物イオン濃度は約0.1%となり、試料2-3の測定値とほぼ一致する。

表-7 コア試料中の細孔量の分布比率

測定位置	試料区分		総細孔量 (mm ³ /g)	分布比率(%)		
	変色/非変色			1nm-25nm	25nm-1μm	1μm-10μm
コア1	変色	1-1a	106.22	24.5	60.2	15.3
	非変色	1-3a	142.84	46.3	32.4	21.3
コア3	変色	3-1a	164.41	14.5	61.5	24.0
		3-1b	147.70	16.4	68.8	14.8
		3-1c	149.71	20.7	68.5	10.8
	非変色	3-3a	156.42	40.4	27.4	32.2
		3-3b	142.20	40.1	26.1	33.8
		3-3c	133.85	37.0	23.3	39.8

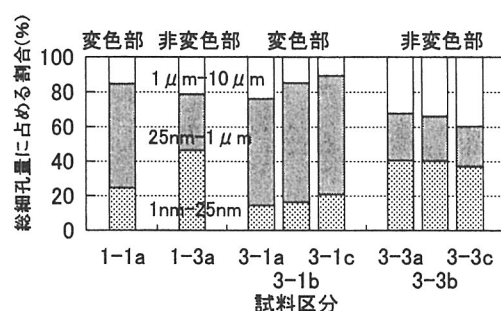


図-6 コア試料中の細孔量の分布比率

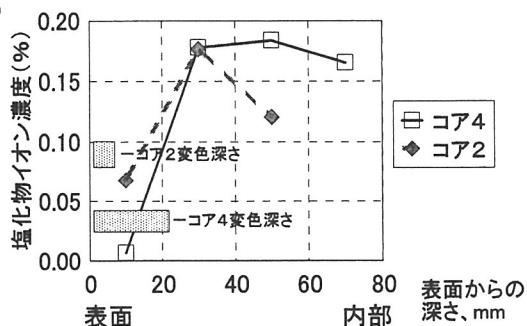


図-7 塩化物量

3.6 表面強度および表面温度

表面強度を測定した結果を図-8に示す。圧縮強度への換算は、建築学会式を用い、材齢係数0.63を乗じて行った。測定点eはコア2の、測定点bはコア4の採取位置のすぐ横であるが、それぞれ、推定強度はコア強度に近い値となった。ゾーンAの4点の平均は20.5N/mm²、ゾーンBの4点の平均は18.6N/mm²であり、約10%の強度差があった。両者の間に強度の有意差があるかどうかを検討したところ、危険率5%で有意、すなわち「ゾーンAの表面強度はゾーンBの表面強度より大きい」という結果であった。それぞれのゾーン内でも、表面が変色している部分は変色していない部分より強度が低い、また、

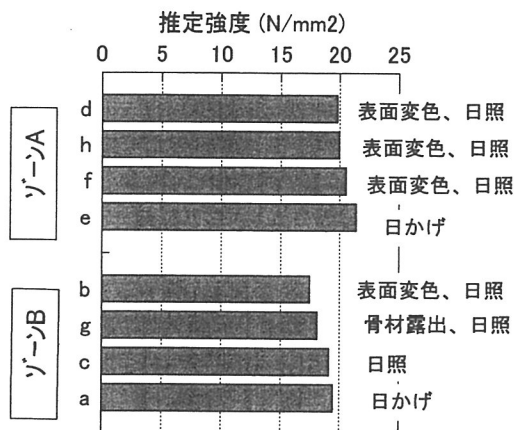


図-8 屋上床面の表面強度

表-8 屋上床面の表面温度

測定：2000/3/2am11:40～11:55

観測点	a	b	c	d	e	f	g	h	i
ゾーン	B	B	B	A	A	A	B	A	B
日照状態	日かげ	日なた	日なた	日なた	日かげ	日なた	日なた	日なた	日なた
表面状態		変色		変色		変色	骨材露出	変色	骨材露出
表面温度(°C)	10	28	32	22	4	25	24	25	31

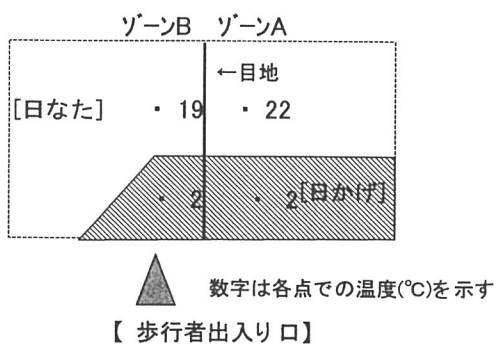


図-9 屋上出入口付近の表面温度

日照のある部分は日かげの部分よりもやや強度が低い傾向がうかがえる。

表面温度については、測定したのは3月上旬の昼前であるが、表-8に示すように、日かげでは4～10℃、日なたでは22～32℃であった。屋上への歩行者出入口付近の日かげでは最も低く2℃であった(図-9)。こうした温度の違いにより、ゾーンAとゾーンBとでは炭酸化的進行速度が異なってくる。すなわち、温度の高いゾーンBの方が炭酸化的進行が速くなる²⁰⁾。また、日照を受けることにより乾燥が早くなり、日かげの部分では乾燥が遅くなる。降雨などによりコンクリート内の細孔が水分で満たされる期間が長くなると、炭酸化深さが小さくなる²¹⁾²²⁾。したがって、ゾーンAの方が、日かげになる時

間が長いので乾きにくくなり、炭酸化の進行は抑制されることになる。

4. 劣化メカニズムの検討

まず、ゾーンAのコンクリートは、中性化深さから考えて、変色を考慮しなければ十分健全と考えられた。一方、ゾーンBのコンクリートは表面の劣化状況から考えて、やや品質の落ちるコンクリートであったと考えられる。建設当初は小さな差であったと思われるが、日照による乾湿繰り返しおよび大きな温度差、塩分の内部への濃縮などによって変色・炭酸化のスピードが促進された結果、大きな差異を生じるに至ったものと推測する。

本報告の概要で述べた検討ポイントの①は、このように、ゾーンBのコンクリートの質および環境条件に由来するものと考えられる。例えば、施工時に降雨・降雪など何らかの理由によって表面仕上げが十分に施されなかったり、また初期硬化時に初期凍害を受けていた、などの可能性があげられる。そのため、ゾーンBのコンクリートの表層部はポーラスになり、その結果、表層の剥離も生じやすくなり、炭酸化も起こりやすい状態になったのではないかと考える。

検討のポイント②の「変色を伴う炭酸化の発生」については、中性化深さの小さなゾーンAも中性化深さの大きなゾーンBにも共通の現象である。両者の非変色部コンクリートの微粉碎試料を促進中性化させ、粉末X線回折試験を行った結果、ファッテライトの生成が確認できたことにより、両者とも、建設当初から分解しやすいC-S-H水和物ができていたために、炭酸化によって変色したのではないかと考える。その原因としては、材料的な要因が考えられるが、今回の試験では特定できる結果を得ることができなかった。「炭酸化によるC-S-H水和物の分解＝変色」とは限らず、この点の究明については今後の課題としたい。

5. まとめ

変色を生じたコンクリートの物性について検討した結果、以下のことが確認できた。

- (1) 変色した部分ではセメントの水和物(C-S-H水和物)が炭酸化によって分解し、コンクリートの微細構造がポーラスになっていることが示差熱分析や細孔径分布などの試験結果から確認できた。このことにより強度も低下する可能性がある。
- (2) コア試料の一部を促進中性化させた試験により、ゾーンAおよびゾーンBとも分解しやすいC-S-H水和物が

建設当初からできていたために、変色を伴う炭酸化が生じたと考える。

- (3) 劣化の進行度合の違いについては、施工条件による表層部の品質の違い、および日射条件や乾湿の状態などの環境条件の違いが炭酸化の進行速度に大きな影響を及ぼしたと考える。

[参考文献]

- 1) 小林一輔：コンクリートが危ない、岩波新書616、岩波書店、1999.
- 2) 日経コンストラクション、No.246、pp.37-40、1999. 12.24.
- 3) 日経コンストラクション、No.240、pp.52-53、1999. 9.24.
- 4) 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部、1963.
- 5) 日本建築学会：コンクリートの調査設計・調査管理・品質検査指針案・同解説、1976.
- 6) 依田彰彦：コンクリート中の鋼材腐食の現状－中性化の影響－、コンクリート工学、Vol.19、No.3、pp. 36-38、1981.3.
- 7) 小林一輔・宇野祐一：コンクリートの炭酸化とその評価、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.10、No.2、pp.431-436、1988.
- 8) 小林一輔 編：コア採取によるコンクリート構造物の劣化診断法、森北出版、1998.
- 9) 松里広昭・船戸已知雄・山崎之典：炭酸化したセメント硬化体の強度と微細構造、セメント・コンクリート論文集、No.46、pp.592-597、1992.
- 10) 丸山 弘・小野島 守：コンクリート橋梁の劣化診断技術に関する調査、コンクリートの炭酸化に関するシンポジウム論文集、日本コンクリート工学協会、pp.65-70、1993.4.
- 11) 高田良章・魚本健人：中性化の進行に伴うコンクリートの品質変化、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.14、No.1、pp.901-904、1992.
- 12) 岡村隆吉・武広 実・橋本誠一・宇智田俊一郎：炭酸化したセメント組成物のキャラクタリゼーション、コンクリートの炭酸化に関するシンポジウム論文集、日本コンクリート工学協会、pp.1-8、1993.4.
- 13) 小林一輔・宇野祐一：炭酸化がコンクリートの強度性状に及ぼす影響、日本建築学会大会学術講演梗概集A、pp.175-176、1994.
- 14) 佐々木孝彦・立松英信・岩淵研吾・賛田秀世：実構造物から採取したセメント硬化体の促進炭酸化による変化、コンクリートの炭酸化に関するシンポジウム論文集、日本コンクリート工学協会、pp.9-14、1993.4.
- 15) 塚山隆一：中性化したコンクリートのポロシチー、セメント・コンクリート、No.274、pp.28-33、1969.
- 16) H.Uchikawa, S.Uchida, S.Hanehara, 2nd International Symposium on Cement and Concrete (Beijing), Vol.1, pp.314-330, 1989.
- 17) 日本建築センター：コンクリートの塩化物総量規制とアルカリ骨材反応対策－建設省住宅局建築指導課長通達の解説－、1987.10.
- 18) 小林一輔・白木亮司・河合研至：炭酸化によって引き起こされるコンクリート中の塩化物、硫黄化合物及びアルカリ化合物の移動と濃縮、コンクリート工学論文集、Vol.1、No.2、pp.69-82、1990.
- 19) 岸谷孝一・小林一輔・榎野紀元・宇野祐一：塩化物を含むコンクリート中における鉄筋腐食と中性化との関係、コンクリート工学論文集、Vol.2、No.1、pp.77-84、1991.
- 20) 阿部道彦・榊田佳寛・田中 斉・柳 啓・和泉意登志・友沢史紀：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、No.409、pp.1-10、1990.3.
- 21) 依田彰彦・横室 隆：各種セメントを用いたコンクリートの中性化深さ、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.9、No.1、pp.327-332、1987.
- 22) 嵩 英雄・和泉意登志・友沢史紀・福士 勲：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、第6回コンクリート工学年次講演会論文集、pp.181-184、1984.