

# 論文 コンクリートの中性化深さと炭酸化フロント深さとの関係—促進中性化試験、屋外暴露試験、実態調査、理論的解析の結果からの考察

福島敏夫<sup>\*1</sup>・吉崎芳郎<sup>\*2</sup>・友澤史紀<sup>\*3</sup>・高橋幸一<sup>\*4</sup>

**要旨：**促進中性化試験、屋外暴露試験、既存建築物に対する実態調査に基づいて、フェノールフタレン1%溶液によるコンクリートの中性化深さと、粉末X線回折分析及び、熱分析による炭酸カルシウム-水酸化カルシウム濃度分布との関係を調べた。その結果、フェノールフタレン1%溶液の示す中性化深さは、炭酸カルシウムと水酸化カルシウムが混在する部分炭酸化領域にあり、炭酸カルシウムが存在しなくなる炭酸化フロント深さの約半分に相当することが明らかになった。また、理論的にも、中性化深さが炭酸化フロント深さの約半分になるということを導くことができた。

**キーワード：**中性化深さ、炭酸カルシウム、水酸化カルシウム、炭酸化フロント

## 1.はじめに

コンクリートの中性化深さは、内部鉄筋の腐食と関連して、鉄筋コンクリート造建築物の物理的耐用年数の設定の基礎となっており、その進行の評価・予測は、古くて今なお新しい研究対象である<sup>1)</sup>。このコンクリートの中性化の経時進行は、様々な外的・内的要因の影響を受けるため、中性化進行に及ぼす諸条件の影響を明確にするための研究例も多く、また、中性化進行速度式も多数報告されている<sup>2)~5)</sup>。しかし、その基礎となる中性化深さが炭酸化フロントとどのような関係になるかは、理論と実験及び実態との比較を行うためには、必要不可欠であるが、研究例はそれ程多くない。このため、フェノールフタレン1%溶液の示す中性化深さと炭酸カルシウム-水酸化カルシウムの濃度分布の関係に関して、著者らがこれまでに得た促進中性化試験、屋外暴露試験及び現場実態調査の結果<sup>6)~8)</sup>を整理し、理論的解析結果<sup>9)~10)</sup>との比較を行った。

## 2.研究方法

### 2.1 中性化深さ測定法

中性化深さの測定は、主にフェノールフタレン1%エタノール溶液(JIS k8006-1961規定)を用いた。現場実態調査では、そのままコンクリートはつり面に、またコンクリートコアについては、割裂面を24時間水中に浸漬した後に、乾燥して表乾状態にした後、噴霧し、赤紫色に着色しない部分のコンクリート表面からの平均距離を中性化深さとした。

### 2.2 熱分析法

105°C絶乾状態のコンクリート粉末試料について、(株)真空理工製Model TGD-3000-45の赤外線フラッシュタイプの示差熱天秤を用いて、一定の昇温速度(20°C/min)で、熱重量曲線(TG)、示差熱曲線(DTA)、微分熱重量曲線(DTG)の同時測定を行った。

\*1 建設省建築研究所第二研究部複合材料研究官、工博(正会員)

\*2 八洋コンクリートコンサルタント㈱技術センター、次長(正会員)

\*3 東京大学大学院工学系研究科建築学専攻教授、工博(正会員)

\*4 八洋コンクリートコンサルタント㈱技術センター、研究員

## 2. 3 粉末X線解析法

105°Cの絶乾状態のコンクリート粉末試料について、(株)島津製作所製Model XD-3の粉末X線回折装置を用い、粉末X線解析スペクトルにおける $\text{CaCO}_3$ 及び $\text{Ca(OH)}_2$ の回折ピークの相対値の比較を行った。

## 2. 4 現場実態調査

60年経過した既存鉄筋コンクリート造建築物の雨の降りかからない屋外側の柱からコンクリートコアを切り抜き、フェノールフタレイン1%溶液による中性化深さ近傍でのコンクリート粉末試料について熱分析を行った。他方、17年経過した既存鉄筋コンクリート造壁式共同住宅の2階及び4階の東西南北の外壁から貫通コンクリートコアを切り抜き、中性化深さ近傍でのコンクリート粉末試料について、粉末X線回折分析を行った。

## 2. 5 屋外暴露試験法

建設省建築研究所屋外暴露試験場(東経 $140^{\circ} 3' 39''$ 、北緯 $36^{\circ} 7' 38''$ )に、雨の降りかかる打放しの鉄筋コンクリート造外壁を想定した試験体(水セメント比55、60、65%の普通A Eコンクリートを使用、かぶり厚さ4cm)を暴露した。

## 2. 6 促進中性化試験法

現場打ち用コンクリート(水セメント比60%、スランプ18cm)及びPC板用コンクリート(水セメント比55%、スランプ8cm)の2種類の打放しコンクリート試験体について、 $\text{CO}_2$ 濃度5%、30°C、60%R.Hの条件下で5ヶ月の促進中性化試験を行って、中性化深さ近傍でのコンクリート粉末試料について、粉末X線回折分析を行った。

## 2. 7 理論的解析法

コンクリート中に非定常拡散する二酸化炭素( $\text{CO}_2$ )が、水酸化カルシウム( $\text{Ca(OH)}_2$ )との炭酸化反応により炭酸カルシウム( $\text{CaCO}_3$ )として固定化されることにより、コンクリートの中性化が進行する。この状況は、次の形の炭酸化反応を伴う非定常拡散方程式で表わすことができる。

$$\frac{\partial C_A}{\partial t} = D \left( \frac{\partial^2 C_A}{\partial x^2} \right) - k C_A C_B = D \left( \frac{\partial^2 C_A}{\partial x^2} \right) - k \cdot C_A \quad (1)$$

ここで、 $C_A$ :コンクリート中の $\text{CO}_2$ 濃度、 $C_B$ :コンクリート中の $\text{Ca(OH)}_2$ 濃度、D:コンクリート中の $\text{CO}_2$ の有効拡散係数、k:炭酸化反応の2次反応速度定数、 $k'$ :炭酸化反応の擬1次反応速度定数( $k'=k C_{B0}$ )、 $C_{B0}$ :コンクリート中での $\text{Ca(OH)}_2$ の初濃度を表わす。

$$[初期条件] : t \leq 0, x < \infty ; C_A = 0 \quad (2)$$

$$[境界条件] : t > 0, x = 0 ; C_A = C_{A0} \quad (3)$$

$$t > 0, x \rightarrow +\infty ; C_A = 0 \quad (4)$$

式(2)、式(3)、式(4)を基にして、式(1)にLaplace変換法を利用し、 $C_A$ の解析解を求めるとき、次のように、指数関数と余誤差関数を含む式になる。

$$C_A / C_{A0} = (1/2) \left\{ \exp(-x \sqrt{k'/D}) \operatorname{erfc}(x / 2\sqrt{Dt} - \sqrt{k't}) + \exp(x \sqrt{k'/D}) \operatorname{erfc}(x / 2\sqrt{Dt} + \sqrt{k't}) \right\} \quad (5)$$

### 3. 研究結果

#### 3. 1 現場実態調査結果

図-1に、約60年経過した鉄筋コンクリート造建築物の雨の降りかからない屋外の柱から採取したコンクリートのフェノールフタレイン1%溶液による着色近傍での熱分析結果を示す。また、図-2は、17年経過した鉄筋コンクリート壁式構造共同住宅の東側外壁から切り出した貫通コンクリートコアについての粉末X線回折分析結果を示す。

#### 3. 2 屋外暴露試験結果

図-3に、建設省建築研究所屋外暴露試験場に8年間暴露されていた打放しの鉄筋コンクリート造外壁を想定した試験体について、はつり面でのフェノールフタレイン1%溶液の中性化深さと粉末X線回折分析による $\text{CaCO}_3 - \text{Ca(OH)}_2$ の濃度分布の関係を示す。また、中性化深さと炭酸化フロントの関係を表-1に示す。

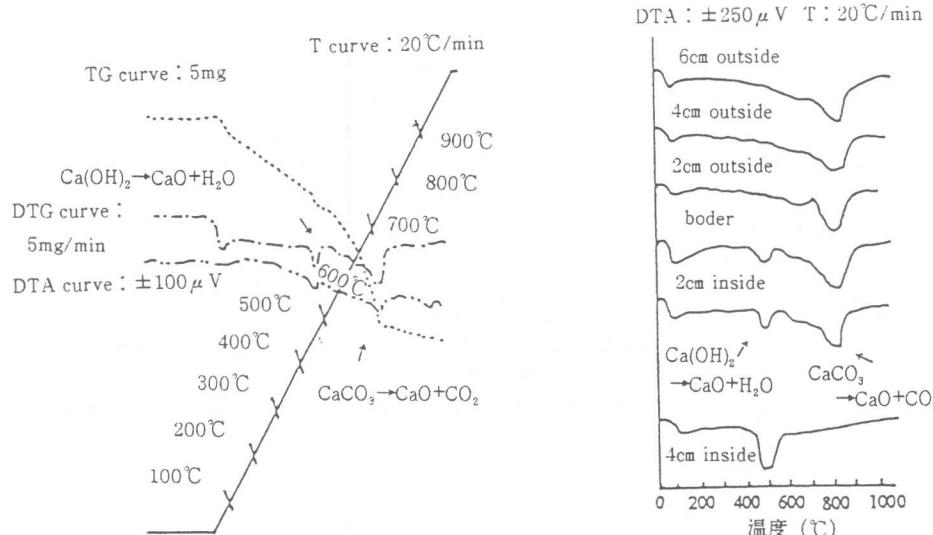


図-1-(a) 60年経過した雨の降りかからない屋外柱から切り抜いたコンクリートコアに関する曲型的な熱分析曲線

図-1-(b) 左記のコンクリートコアの中性化深さ(6cm)近傍における示差熱分析曲線

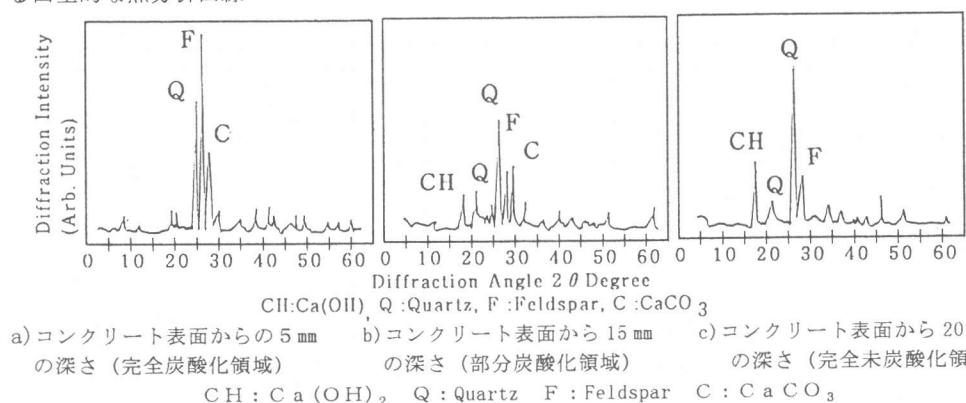


図-2-(a) 17年経過した鉄筋コンクリート造壁式構造共同住宅の東側外壁から切り抜いたコンクリートコアに関する曲型的な粉末X線回折パターン

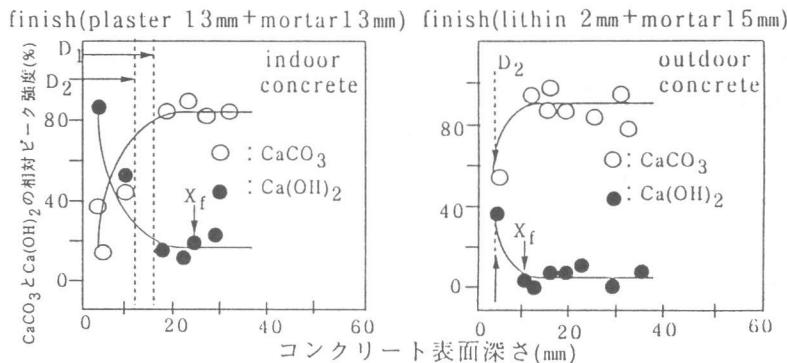


図-2-(b) 上記のコンクリートコアの中性化深さ ( $D_1=18\text{ mm}$ ,  $D_2=15\text{ mm}$ ) と粉末X線回折分析による $\text{CaCO}_3$ - $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 濃度分布の関係

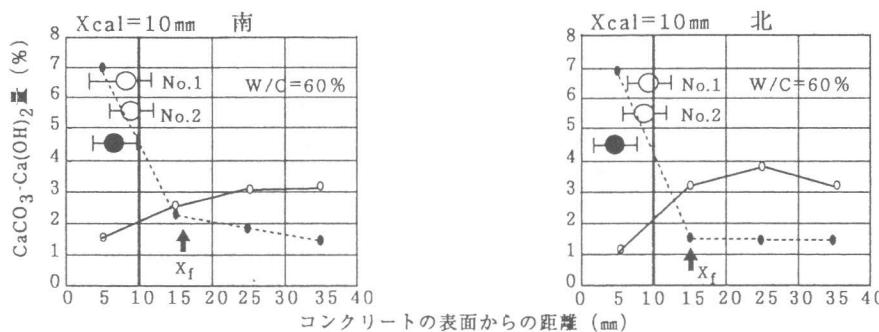


図-3 屋外暴露試験結果（8年間暴露したコンクリートに関する中性化深さと $\text{CaCO}_3$ - $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 濃度分布の関係）

表-1 図-3の関係から求めた中性化深さと炭酸化フロントとの関係

水セメント比 (%)	中性化深さ ( $X_n$ ) (mm)		炭酸化フロント ( $X_f$ ) (mm)		$X_n/X_f$	
	南	北	南	北	南	北
55	7.5	5.1	15.5	14.3	0.5	0.4
60	8.4	7.2	16.1	15.1	0.5	0.5
65	9.8	8.4	17.4	15.2	0.6	0.6

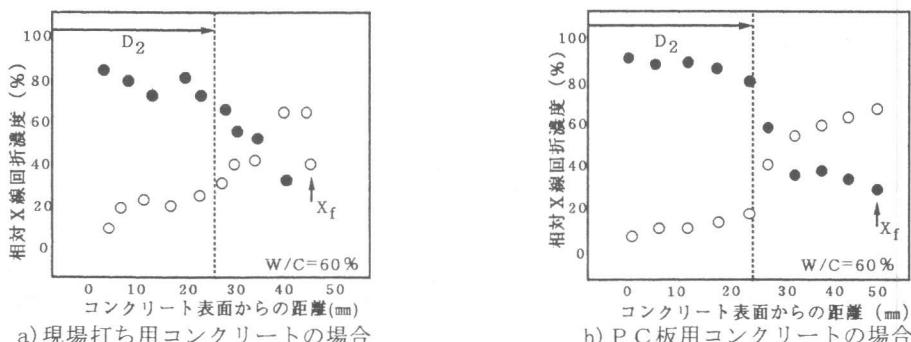


図-4 促進中性化試験結果（5ヶ月後のコンクリートに関する中性化深さと $\text{CaCO}_3$ - $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 濃度分布の関係）

### 3. 3 促進中性化試験結果

図-4は、促進中性化試験5ヶ月後のコンクリート試験体についてのフェノールフタレイン1%溶液による中性化深さと $\text{CaCO}_3\text{-Ca(OH)}_2$ の濃度分布の関係を示す。

### 3. 4 理論的解析結果

図-5は、非定常速度解析による炭酸化進行予測図であり、換算濃度分布とコンクリート表面からの距離関係を経過時間をパラメーターで示したものである。

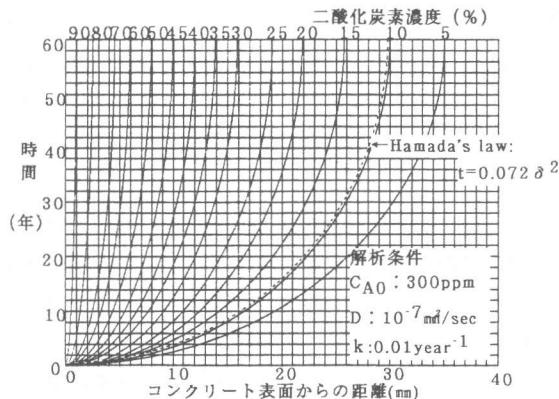


図-5-(a)  $\text{CO}_2$ 換算濃度をパラメーターとしたコンクリート表面からの深さと時間との関係(水セメント比60%の場合) ( $\text{CO}_2$ 換算濃度が表面濃度の10%に相当する深さを中性化深さとすれば、コンクリートの中性化進行は、浜田式と一致する。)

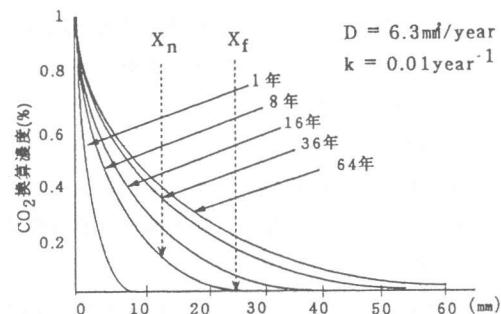
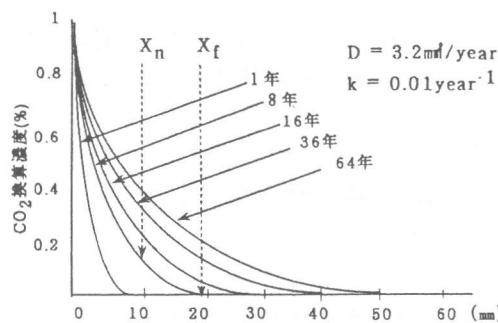


図-5-(b) コンクリートの炭酸化進行シミュレーション(水セメント比60%の場合)

図-5 理論的解析結果

### 4. 議論と考察

現場実態調査の結果は、熱分析法でも、粉末X線回折分析法でも、フェノールフタレイン1%溶液による着色境界としての中性化深さ( $X_n$ )は、 $\text{CaCO}_3$ と $\text{Ca(OH)}_2$ とが共存する部分炭酸化領域にあり、 $\text{CaCO}_3$ が存在しなくなる炭酸化フロント深さ( $X_f$ )は、かなり内部にあることが明らかである。また、図-2-(b)の $D_1$ で示されるのは、同じフェノールフタレイン溶液でもフェノールフタレイン1g+99.5V/V%エタノール100mlで作られるA溶液による中性化深さであり、 $D_2$ で示されるのは、フェノールフタレイン1g+95.0V/V%エタノール90ml+水→100mlで作られるB溶液(JIS規定)での中性化深さであり、A溶液の方がB溶液より水分量が少ないので、着色状況が劣るもの、結果的には、より炭酸化フロントに近い深さを示すことを意味する。他方、8年間の屋外暴露試験及び5ヶ月間の促進中性化試験によるコンクリートの中性化深さと $\text{CaCO}_3\text{-Ca(OH)}_2$ 濃度分布との関係は、現場実態調査における状況と酷似しているが、中性化深さが炭酸化フロント深さの約半分であるという新しい知見が得られており、理論的解析

結果もそれを裏付けている。すなわち、コンクリート中のCO<sub>2</sub>換算濃度は、時間とコンクリート表面からの距離により変化し、表面濃度の10%に対応するコンクリートの中性化深さより、0.01%に対応する炭酸化フロント深さははるかに内部にあり、約2倍のところにあることになる。

## 5. 結論

コンクリートの中性化機構の理解と合理的な中性化進行予測法の確立のための基礎として、コンクリートの中性化深さと炭酸化フロントとの対応関係を求めるために、コンクリートの中性化深さとCaCO<sub>3</sub>とCa(OH)<sub>2</sub>濃度分布との関係についての諸データを整理すると共に、理論的解析を行った。その結果、次の結論が得られた。

- (1) フェノールフタレン1%溶液による着色境界としての中性化深さは、CaCO<sub>3</sub>とCa(OH)<sub>2</sub>が混在する部分炭酸化領域にあり、同溶液による中性化深さは、CaCO<sub>3</sub>が存在しなくなる炭酸化フロント深さとは必ずしも一致しない。
- (2) 実験的・実態調査結果から、コンクリートの中性化深さは、炭酸化フロント深さの約半分であることが明らかとなり、理論的解析からも裏付けが得られた。

## [謝辞]

本研究を実施するにあたっては、参考文献の2)、3)、4)として引用されている論文、書籍をはじめとして、多くの論文、書籍の著者の方々に、情報提供という意味で多大な貢献を頂いた。ここに改めて深謝したい。

## [参考文献]

- 1) 福島敏夫：“鉄筋コンクリート造建築物の寿命”、142p.、技報堂出版（1990）
- 2) 浜田 稔：コンクリートの中性化と鉄筋腐食、セメント・コンクリート、No. 272、pp. 2～18 (1969)
- 3) 岸谷孝一：鉄筋コンクリートの耐久性、165p. 鹿島建設技術研究所出版部（1963）
- 4) 森 徹、白山和久、上村克郎、依田彰彦：高炉セメントコンクリートの炭酸化について、同、No. 307、pp. 40～46 (1972)
- 5) 福島敏夫：コンクリートの中性化進行の理論的予測法と数値解析—鉄筋コンクリート造外壁の耐久性予測法に関する研究（その1）—、日本建築学会大会構造系論文報告集、第428号、pp. 1～15 (1991.10)
- 6) 福島敏夫、川瀬清孝、友澤史紀、赤石 博：既存RC造建築物の外・内壁コンクリートの中性化と炭酸化との関連性—仕上材、含水状況、使用するフェノールフタレン溶液の影響、日本建築学会大会学術講演梗概集（東北）、A（材料・施工）、pp. 253～254 (1982)
- 5) 福島敏夫、友澤史紀：コンクリートの中性化深さの物理化学的意味について、セメント・コンクリート論文集、No. 43、pp. 424～429 (1989)
- 8) 吉崎芳郎、福島敏夫、高橋孝一：コンクリートの中性化深さと炭酸カルシウム－水酸化カルシウムの濃度分布、セメント・コンクリート論文集、No. 50、pp. 404～409 (1996)
- 9) 福島敏夫、渡辺義維：鉄筋コンクリート造外壁の耐久性予測－コンピューター計算によるコンクリートの中性化進行の予測、同（関東）、A（材料・施工）、pp. 1204～1205 (1988)
- 10) 福島敏夫：非定常速度論解析に基づくコンクリートの中性化進行予測法－大気中の二酸化炭素濃度の増大傾向の影響－、マテリアルライフ、Vol. 2、No. 2、pp. 113～123 (1990.4)