

## [1059] 各種の表面層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

正会員 ○馬場明生 (建設省建築研究所)

正会員 千歩 修 (建設省建築研究所)

### 1. はじめに

この論文は、各種の表面層をもつコンクリートの中性化を予測する方法について、一提案を行うことを目的としている。現実のコンクリートは、各種の仕上材料・打込み型砕材料等によって被覆されることが多く、打放しコンクリートの場合ですら、浸透性の塗膜が施工されることが多い。このような傾向は、特に建築物に用いられているコンクリートにおいて著しい。さらに、現実のコンクリートは、耐久性上重要なコンクリートの表面層が養生不足になり、結果として耐久性が低下することが多い。一方、補修用として各種の浸透性・非浸透性の塗付け材料が普及している。

このように、コンクリートの表面層が、中性化に及ぼす効果を予測することは重要である。ここでは、中性化予測のための前提として、現実に存在する表面層の形態を中性化の予測の面から分類し、それぞれについて予測方法を提案する。

### 2. 表面層の分類

中性化が鉄筋コンクリートの劣化現象のうち最も重要な現象の1つであることは、誰もが一致するところである〔1〕。また、中性化は、いかなる環境条件下においても漸次進行するということで、その深さは鉄筋コンクリートの物理的な耐久性能（物理的な寿命）を予測するための基本的な尺度である。さらに、養生不足や含浸材の塗付けなどのコンクリートの表面状態、並びに各種仕上げ等のコンクリート部材外部に位置する表面層は、中性化の進行に大きな効果があると予測される。コンクリートの表面層を分類する場合には、以下の分類軸について考える必要がある。

- (1) 対象の構造物は新築か既存か
- (2) 表面層のコンクリートの表面に対する位置並びに物理的・化学的性質

第1の分類軸については、新築か既存かで中性化深さを予測する時点が異なる。第2の分類軸については、以下の3つのタイプに分類して考えることができる。

- (1) タイプ1：内部コンクリートと異なる中性化速度係数のコンクリートが表面層にある場合
- (2) タイプ2：構造体コンクリートの表面にセメント系の仕上げ材料がある場合
- (3) タイプ3：構造体コンクリートの表面に非セメント系の仕上げ材料がある場合

上記の表面層に関する基本分類に対応する典型的な材料および工法を図1に示す。この分類は、ここでは基本的に新築の場合について述べているが、既存構造物の改修および補修の場合についても時間軸を変化させるだけで適用できる。

### 3. 中性化に関する既往の知見

コンクリートの中性化については、これまで多くの研究が実施され、多くの有効な知見が明らかにされている。これらの研究を基本的な面について要約すると、以下の3つの事項となろう。

- (1) コンクリートの中性化深さと暴露時間との関係は方程式(1)によって表現できる。

$$D = A c \sqrt{T} \quad \text{--- (1)}$$

ここで、D： 中性化深さ (mm)

T： 暴露時間 (実態調査では年, 促進試験では日)

A c： 中性化速度係数 (mm/年<sup>1/2</sup> またはmm/日<sup>1/2</sup>)

(2) 中性化速度係数は、普通ポルトランドセメントを用いた水セメント比が0.6 以下の実際的な暴露条件下では、水セメント比によって方程式(2)のように表現される (図2 参照) (1)。

$$A c = 1.77 W/C - 0.66 \quad \text{----- (2)}$$

ここで、W/C： 水セメント比

(3) 中性化速度係数は、方程式(3)のような形態の方程式で表現できる (図3 参照) (2, 4)。

$$A c = B \left( \frac{1}{\sqrt{F c}} - \frac{1}{\sqrt{F o}} \right) \quad \text{----- (3)}$$

ここで、F c：コンクリートの圧縮強度

F o：実験定数 (A cが0となるときコンクリート強度という物理的な意味をもち、平均的には625 kgf/cm<sup>2</sup>程度)

B： 実験定数 (炭酸ガス濃度などの暴露条件による定数で、5%CO<sub>2</sub> 濃度下では121.2 程度)

- タイプ1
  - 養生不足のコンクリート表面層
  - 含浸材により致密化されたコンクリート表面層
  - 吸水により致密化されたコンクリート表面層
  - 組積造におけるセメント系フェイスシェル
  - コンクリート系打ち込み型枠
- タイプ2
  - セメントモルタルなどのセメント系仕上げ
  - 補修用および吹き付け用のポリマセメントモルタル
- タイプ3
  - 仕上げ塗り材仕上げ
  - 塗装
  - 壁紙
  - れんが・タイルなどのセラミック系

図1 コンクリート表面層の例

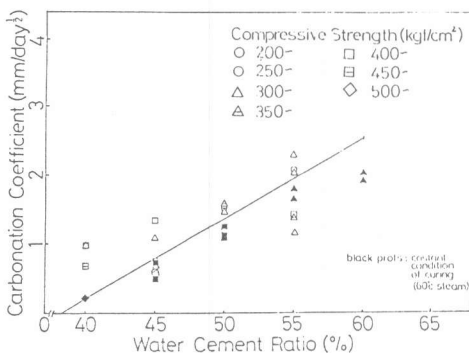


図2 コンクリートの水セメント比と中性化速度係数との関係 (養生条件を良好な範囲で一定とすると実験値は方程式(2)に近くなる。)

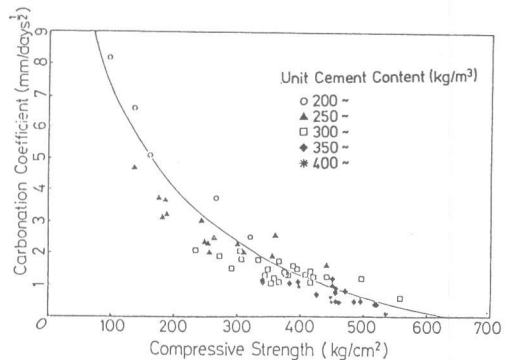


図3 コンクリートの圧縮強度と中性化速度係数との関係 (圧縮強度が約200kgf/cm<sup>2</sup>以下になるところから中性化速度係数は急に大きくなる。)

中性化速度係数とコンクリートの調合および強度との関係について(2)および(3)に述べたが、上述の3つの事項の他に忘れてならないのは、コンクリートの含水率である。一定の湿度下におけるコンクリートの中性化速度は、強度・水セメント比によらず、コンクリート中にある水の満たされていない空隙の量によって決定される。一般に強度が大きいほど、水セメント比が小さいほどこのような空隙の量は小さく、中性化速度は小さくなる〔3〕。

4. 表面層の効果に関する基本方程式

4. 1 等価時間の原則

ここでは、表面層の効果に関する基本方程式を提案する。まず、タイプ1の場合について考えると、このタイプは図1に示したように、コンクリート部材の表面部分が養生不足、含浸材の塗布等によって異なった中性化速度をもつ場合である。このときは、図4に示すように表面層の部分は方程式(1)に従って中性化する。この場合、中性化速度は $A_f$ で内部コンクリートと異なる。一方、異なった中性化速度をもつ表面層をもたないコンクリートは、中性化速度係数を $A_c$ としたときの方程式(1)に従う。ここで問題となるのは、表面層が中性化した後の内部コンクリートの中性化の進行である。

ここで、表面層を媒介とする内部コンクリートの中性化は、同一の単味のコンクリートの中性化深さ(D)と時間(T)との関係のある時間後の関係となると仮定すると、図4においてこの関係を示す曲線上の点( $D_e e^2/A_c^2, D_e$ )以降を、表面層が丁度中性化する以前の曲線と連結したものとなる。このとき、表面層の厚さを $D_{fo}$ とすると、その時間 $T_1$ は $D_{fo}^2/A_f^2$ となる。

以上において、連結される内部コンクリートのD-T関係の始点の座標中の $D_e$ は表面層のコンクリートの内部コンクリートの中性化の進行に対する有効な厚さとしての物理的な意味をもつ。ここで以下の互いに異なる3つの仮定を設けた。

- (1) 表面層をもつコンクリートにおける表面層が中性化した時間の同一の単味のコンクリートの中性化深さが有効厚さである (等価時間の原則)
- (2) 表面層の厚さ $D_{fo}$ がそのまま有効に働く (等価厚さの原則)
- (3) 表面層の厚さは、少しも効果がない (完全暴露の原則)

これらの仮定を、強度を変化させた2枚の既製のコンクリート表面板の間にコンクリートを打設した試験体を5%CO<sub>2</sub>濃度下で促進中性化させた実験結果(図7参照)と比較すると、第一の等価時間側が最も良く実験値と一致した〔5, 6〕。

等価時間の原則に基づくと、有効厚さ $D_e$ は、方程式(4)で与えられる。

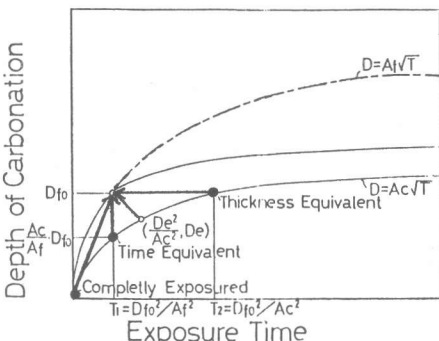


図4 タイプ1表面層をもつコンクリート  
の中性化予測方法

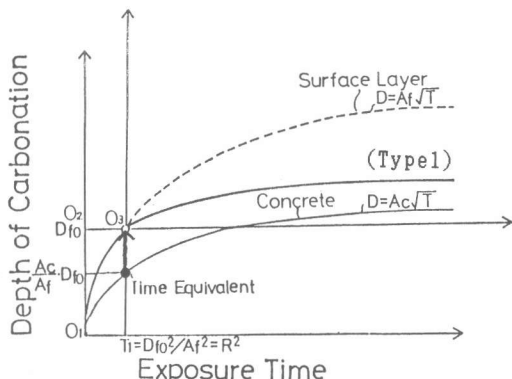


図5 各種表面層をもつ場合の予測方法

$$D_e = \frac{A_c}{A_f} \cdot D_{fo} \quad \text{----- (4)}$$

また、表面層を媒介とした内部コンクリートの中性化深さ（タイプ1の場合、中性化深さは表面層の表面からの値）は、方程式(5)で与えられる。

$$D = A_c \sqrt{T} - D_e + D_{fo} \quad \text{----- (5)}$$

$$D = A_c \left( \sqrt{T} - \frac{D_{fo}}{A_f} \right) + D_{fo}$$

ここで、 $A_f$ ：表面層の中性化速度係数  
 $D_{fo}$ ：表面層の実際の厚さ

#### 4. 2 基本方程式

タイプ1の表面層をもつ場合の中性化深さは、4. 1において求められたが、セメントモルタル仕上げなどのセメント系の仕上げ層をもつタイプ2の場合は、中性化の測定基準位置が表面層とコンクリート躯体との界面となるので、図5に示すようにタイプ1の関係において、原点を中性化深さを表す座標軸方向に表面層の厚さだけ正方向に平行移動した場合（ $0_2$ ）になる。次に、非セメント系の仕上げの場合を示すタイプ3は、タイプ2において既に仕上げ表面層が中性化した場合と考えられるので、図5において原点をさらに時間軸方向に $T_1$ だけ平行移動した場合に相当する。したがって、タイプ3の場合の表面層の中性化速度係数 $A_f$ は仮想中性化速度係数と呼称されるべきもので、拡散性を表す定数である。

以上のことから、表面層のタイプに対応して、以下の方程式が提案できる。

タイプ1

$$D \leq D_{fo} \quad (T \leq T_1) : D = A_f \sqrt{T}$$

$$D \geq D_{fo} \quad (T \geq T_1) : D = A_c (\sqrt{T} - R) + D_{fo} \quad \text{----- (6)}$$

タイプ2

$$D \leq 0 \quad (T \leq T_1) : D = A_f \sqrt{T} - D_{fo}$$

$$D \geq 0 \quad (T \geq T_1) : D = A_c (\sqrt{T} - R) \quad \text{----- (7)}$$

タイプ3

$$D = A_c (\sqrt{T + R^2} - R) \quad \text{----- (8)}$$

ここで、 $R : D_{fo}/A_f$ で中性化抵抗（年 $^{1/2}$  または日 $^{1/2}$ ）

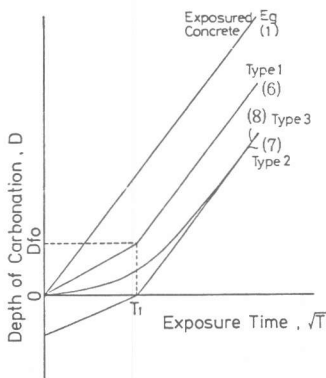


図6 表面層のタイプ別のコンクリートの中性化傾向

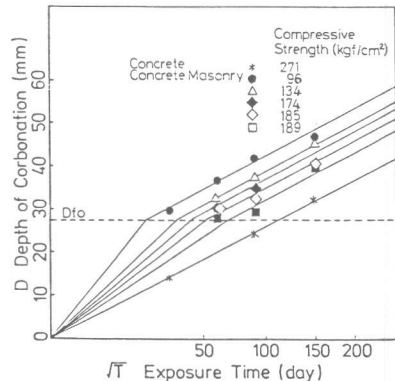


図7 強度の異なるコンクリート表面層をもつコンクリートの中性化傾向と予測方程式の適用

同式において示されるように、表面層の中性化の抑制効果は定数Rで表現できる。Rは時間 $T_1$ の平方根である。これらの基本式を図6にR ( $Df_0/Af$ ),  $A_c$  ( $Af < A_c$ )を一定とした場合について示した。タイプ2と3とは、長期暴露後では互いにほぼ同一の値となる。

### 5. 考察

タイプ1については、図7に示すコンクリートブロックからなる異種のコンクリート表面層にコンクリートを充填した場合についての実験結果を方程式(6)との関連で示した。このタイプには、養生不足で表面層の中性化速度係数が低下した場合、含浸材を表面に浸透させた場合などがあり、この場合の中性化深さの増加量Dreは、方程式(9)で表現できる。

表1 各種表面層の中性化抑制効果 (実験 5, 6, 7)

暴露条件	仕上げ材料	圧縮強度 ( $kg/cm^2$ )	仕上げ厚 (mm)	中性化抵抗 R	中性化速度係数 $Af(Af^*)$
CO <sub>2</sub> 4% (23°C 50%)	セメントモルタル1	200	15	$4.20 day^{1/2}$	$3.57 mm/day^{1/2}$
	セメントモルタル2	58	15	1.46	10.30
	れんが1	156	15	0.75	(20.0)
	れんが2	527	15	1.36	(1.10)
	れんが3	888	15	1.50	(0.10)
CO <sub>2</sub> 5% (30°C 60%)	コンクリートブロック1	186	28	$5.60 day^{1/2}$	$5.00 mm/day^{1/2}$
	コンクリートブロック2	146	28	5.97	4.69
	珧器質タイル	400	20	5.00	(4.00)
	ビニールクロス (塩化ビニール)	—	0.3	891	$(3.37 \times 10^{-4})$
	マスチック (CE)	—	0.8	18.7	$(4.27 \times 10^{-2})$
	砂壁状吹付材 (E)	—	0.3	1.90	$(1.58 \times 10^{-1})$
	アクリル系複層吹付け材(E)	—	0.8	19.9	$(4.02 \times 10^{-2})$
	エポキシ系複層吹付け材(RE)	—	0.8	1.28	$(6.23 \times 10^{-2})$
	セメントモルタル	—	15	9.27	1.62
	実 態 調 査	セメントモルタル (42年)	—	25	$3.49 Y^{1/2}$
しっくい (42年)		—	19	0.02	$(1.05 \times 10^3)$
セメントモルタル (52年)		—	28	4.90	5.66
タイル (52年)		—	21	2.37	(8.87)

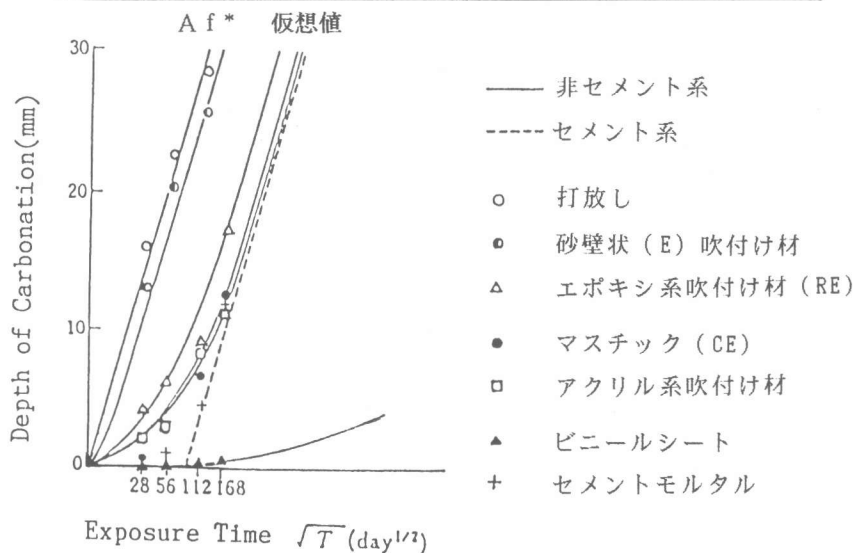


図8 各種仕上げ層をもつコンクリートの中性化傾向 (実験7)

$$D_{re} = \left(1 - \frac{A_c}{A_f}\right) D_{fo} \quad \text{----- (9)}$$

もし、表面層の中性化速度係数が内部コンクリートの2倍であったとき、表面層の厚さの半分だけ中性化が早くなることになる。逆に、表面層を経密化することは、たとえ表面層の厚さが小さくとも、中性化は著しく遅くできることを示している。

タイプ2と3の場合については、既存の実験結果〔7〕との関連で方程式(7)および(8)を対応させると図8のようになる。また、既往の実験結果〔5, 6, 7等〕に基づいて、表面層の効果に関して示すと表1のようになる。当然厚さと材質とが重要であるが、緻密な仕上げ層を用いることによって、中性化を著しく遅延させることができる。これは仕上げ材料がコンクリートの中性化の進行に対して大きな効果をもつことを示している。

## 6. まとめ

以上の提案および検討結果をまとめると以下の事項のようになる。

- (1) 現実のコンクリートに存在する表面層を、中性化の進行予測の面から3つのタイプに分類した。
- (2) 表面層を媒介とするコンクリートの中性化の進行は、表面層が完全に中性化する時間が重要であり、時間等価則に基づいて予測できる。
- (3) 表面層のタイプ毎に、内部コンクリートの中性化深さを予測する式を提案した。
- (4) 表面層の中性化抑制効果はタイプによらず、中性化抵抗によって表現できる。

## 参考引用文献

- 1) 岸谷孝一, 「鉄筋コンクリートの耐久性」, 鹿島建設, 1963年
- 2) H. G. Smolczyk, Written Discussion (No. III-3) on "Neutralization of Concrete and Corrosion of Reinforcing Steel" by M. Hamada, V-ISCC, 1968
- 3) D. W. S. Ho and R. K. Lewis, "The Effects of Fly Ash and Water-Reducing Agents on the Durability of Concrete," Technical Paper, DBR, CSIRO, Australia, 1981
- 4) 馬場明生, 羽木宏「プレキャストコンクリートの中性化」, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1985年
- 5) Akio Baba and F. D. Beresford, "Carbonation of Reinforced Masonry," 7th International Brick Masonry Conference, Melbourne, Australia
- 6) 馬場明生, 松島泰幸, 「組積造に関する日米共同耐震研究(20), 補強組積構造の耐久性1 (コンクリートブロック造の中性化)」, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1985年
- 7) T. Fukushima and I. Fukushi, "Effects of Surface Finishings on Durability of Reinforced Concrete," First Australia Japan Joint Workshop on Durability of Reinforced Concrete, Tsukuba, Japan, 1986
- 8) F. Tomosawa and I. Fukushi, "A Preliminary Study on the Prediction of Service Life of Reinforced Concrete Based on Carbonation and Corrosion of Reinforcement, 3rd International Conference on the Durability of Building Materials and Components, Espoo, Finland, August, 1984