

# 論文 コンクリートの乾燥度を考慮した外断熱建物躯体の中性化速度予測式の提案

申 雪寒<sup>\*1</sup>・長谷川 寿夫<sup>\*2</sup>

要旨：本研究では、既往の研究文献を考察して得られたコンクリートの質量含水率と中性化速度の関係、および著者らの外断熱工法によるコンクリートの中性化抑制効果の結果を基にして、コンクリートの乾燥度を考慮した外断熱建物躯体の中性化速度予測式を表した。この式により、外断熱工法躯体コンクリートのかぶり厚さまでの中性化年数の算出を可能とした。また、乾燥度を考慮した予測式による中性化深さを、既往の予測式による結果と比較考察した。さらに、実建物の調査を行い、中性化深さの予測式による算定値は実測値とも比較的良好な相関性を示すことを確認した。

キーワード：中性化速度予測式、コンクリートの乾燥程度、外断熱工法

## 1. はじめに

コンクリートの中性化速度と乾燥程度との関係について、相対湿度を用いて中性化速度を評価するのが一般であるが、しかし、同相対湿度の条件でも、コンクリートの質量含水率は調合、材齢および温度などによって異なるので、中性化速度も異なると考えられる。従って、建物躯体コンクリートの中性化速度を評価するには、コンクリートの質量含水率をパラメータとするのが適切である。

また、仕上げ材による中性化抑制効果については、多くの研究者が実験、調査および理論的検討を行って定量的に求めており、中性化速度予測式の中にも反映されているが、しかし、著者ら<sup>1)</sup>が明らかにした外断熱工法による中性化抑制効果は、これらの中性化速度予測式の中には反映されていない。

本研究では、既往の研究文献を考察して得られたコンクリートの質量含水率と中性化速度の関係、および著者らの外断熱工法によるコンクリートの中性化抑制効果の結果を基にして、コンクリートの乾燥度を考慮した外断熱建物躯体の中性化速度予測式を表す。また、予測式に

ついて、乾燥度を考慮して既往の予測式と比較考察する。さらに、実建物の調査を行い、中性化深さの予測式による算定値と実測値との相関性を確認する。

## 2. コンクリートの質量含水率と中性化速度の関係

大岸ら<sup>2)</sup>は、実験によるコンクリートの質量含水率と中性化速度の関係を検討のため、W/C 50%の8cmの立方体を製作し、材齢28日まで水中養生後、飽水状態の含水率に対して、含水率を20, 40, 60%の3段階に乾燥調湿を行い湿度分布均等化後に、温度25℃でCO<sub>2</sub>濃度30%の環境下で、28週間まで促進中性化試験を行った。その結果を、図1に示す。

図1のように、コンクリートの中性化速度と相対質量含水率の間にはやや下凸の曲線状の関係を示し、コンクリートの相対質量含水率が高いほど、中性化速度は遅くなる。これは二酸化炭素の拡散がコンクリートの空隙中に存在する水によって阻害されるためである。この傾向は、依田らの実験結果<sup>3)</sup>とも一致している。

図1より、普通ポルトランドセメントを用い

\*1 松本建工株式会社 物資本部 中国市場開発 リーダー 工博 (正会員)

\*2 北海道大学大学院工学研究科 空間性能システム専攻 助手 工博 (正会員)

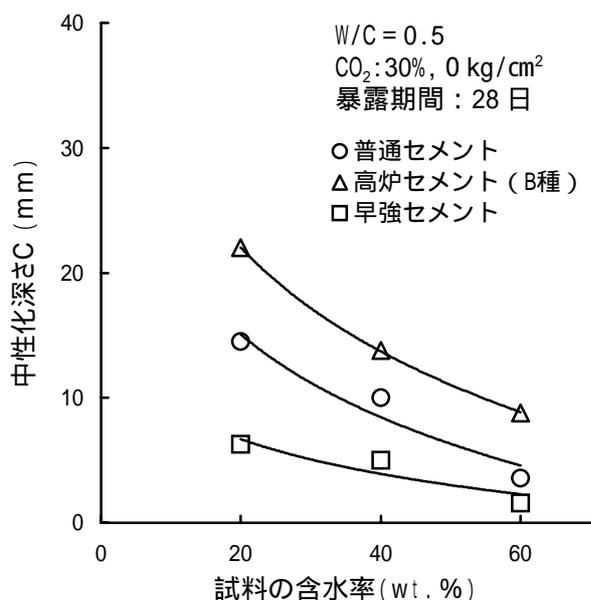


図1 コンクリートの相対質量含水率による中性化の速度<sup>2)</sup>

たコンクリートの相対質量含水率と中性化深さを読み取り、絶対質量含水率と中性化速度係数の関係を、表1のように求めた。

### 3. 外断熱建物躯体コンクリートの屋外側の質量含水率と中性化速度の関係

#### 3.1 外断熱建物躯体コンクリートの屋外側の条件設定

外断熱建物躯体コンクリートの屋外側のCO<sub>2</sub>濃度は0.035%で、コンクリートを普通ポルトランドセメント使用の水セメント比50%と仮定し、温度は約20℃、繊維系断熱材を用いた通気層工法の条件を設定した。この場合の躯体コンクリートの中性化速度と質量含水率の関係を、大岸らの実験結果<sup>2)</sup>(表1)を基にして求める。

大岸らの実験条件はW/C 50%、CO<sub>2</sub>濃度30%、温度25℃であり、外断熱建物屋外側のCO<sub>2</sub>濃度0.035%や躯体コンクリートの温度20℃とは異なっている。外断熱建物躯体屋外側コンクリートの中性化速度係数を求めるには、大岸らの実験結果<sup>2)</sup>(表1)に示している中性化速度係数を、CO<sub>2</sub>濃度と温度について補正が必要である。

#### 3.2 CO<sub>2</sub>濃度と温度による補正

##### (1) CO<sub>2</sub>濃度による補正

一般に、空気中のCO<sub>2</sub>濃度は屋外で0.03~0.035%であり、屋内では居住条件によって異なるが一般事務室で0.1%前後である。ここで、外断熱建物屋外側の自然環境におけるCO<sub>2</sub>濃度を0.035%と仮定して、大岸らのCO<sub>2</sub>濃度30%の実験条件<sup>2)</sup>での中性化速度係数から、繊維系断熱材を用いた通気層工法で建物躯体屋外側コンクリートの中性化速度係数を求める。このためのCO<sub>2</sub>濃度補正係数K1は、以下のように求めることができる。

$$K1 = K^*_{0.035} / K^*_{30} \quad (1)$$

ここに、

K1: CO<sub>2</sub>濃度が30%から0.035%に換算するときの補正係数。

K<sup>\*</sup><sub>0.035</sub>: CO<sub>2</sub>濃度0.035%の場合のCO<sub>2</sub>濃度による係数。

K<sup>\*</sup><sub>30</sub>: CO<sub>2</sub>濃度30%の場合のCO<sub>2</sub>濃度による係数。

上の式の中のCO<sub>2</sub>濃度による係数K<sup>\*</sup>c(K<sup>\*</sup><sub>0.035</sub>, K<sub>30</sub>)は、魚本らの実験式<sup>4)</sup>より、次の式(2)で求めた。

表1 コンクリートの質量含水率と中性化速度係数の関係

相対質量含水率(%) <sup>2)</sup>	絶対質量含水率(%) <sup>*</sup>	中性化深さ <sup>2)</sup> (mm)	中性化速度係数(mm/年)	実験条件
20	1.5	14.2	45.8	・W/C: 50% ・中性化条件: 温度25℃、CO <sub>2</sub> 濃度30% ・中性化促進時間: 28日 ・セメント: 普通ポルトランドセメント ・飽水含水率: 7.3%
40	2.9	10.0	32.2	
60	4.4	5.8	19.7	

\* 絶対質量含水率は、飽水含水率7.3%を基に相対質量含水率から計算した値である。

$$K^*c = (2.804 - 0.847 \log C) \quad C \quad (2)$$

ここに、

$K^*c$  :  $CO_2$  濃度が  $C$  のときの係数。

$C$  :  $CO_2$  濃度 (%) 。

よって、 $K1 = K^*_{0.035} / K^*_{30} = 0.0888$  となる。

## (2) 温度による補正

表 1 に示している中性化速度係数は、大岸らが 25 の実験条件で求めたもので、温度 20 の躯体コンクリートの中性化速度を求めるには、補正する必要がある。中性化速度係数に及ぼす温度による係数  $K_T$  は魚本ら<sup>4)</sup>の実験式より、次のように表すことができる。

$$K_T = e^{(8.478 - 2563/T)} \quad (3)$$

ここに、

$K_T$  : 温度が  $T$  のときの係数。

$T$  : 絶対温度 (K) 。

とって、25 から 20 に換算するときの中性化速度係数の補正係数  $K2$  を以下のように求められる。

$$K2 = K_{20} / K_{25} = 0.89 \quad (4)$$

ここに、

$K2$  : 温度が 25 から 20 に換算するときの補正係数。

$K_{20}$  : 温度 20 の場合の温度による係数。

$K_{25}$  : 温度 25 の場合の温度による係数。

## 3.3 外断熱建物躯体コンクリートの質量含水率と中性化速度係数の関係式

以上より、繊維系断熱材を用いた通気層工法の外断熱建物躯体コンクリートの屋外側が自然環境 ( $CO_2$  濃度 0.035%)、温度 20 で、普通ポルトランドセメント使用で水セメント比 50% の場合は、大岸らの実験結果(表 1)<sup>2)</sup>から  $CO_2$  濃度および温度の換算を行って質量含水率と中性化速度係数の関係を求めると、表 2 および図 2 のようになる。

図 2 に示されているコンクリートの質量含水率と中性化速度係数の関係は、次の式(5)で表すことができる。

$$A' = -1.80 \ln(W) + 4.32 \quad (5)$$

表 2 外断熱建物外壁コンクリートの屋外側の質量含水率と中性化速度係数の関係

質量含水率 (%)	中性化速度係数 (mm/年)	算定条件
1.5	$45.8 \times 0.0888 \times 0.89 = 3.6$	・セメント:普通ポルトランドセメント
2.9	$32.2 \times 0.0888 \times 0.89 = 2.5$	・W/C:50% ・温度:20
4.4	$19.7 \times 0.0888 \times 0.89 = 1.6$	・ $CO_2$ 濃度:0.035% ・繊維系断熱材 ・通気層工法

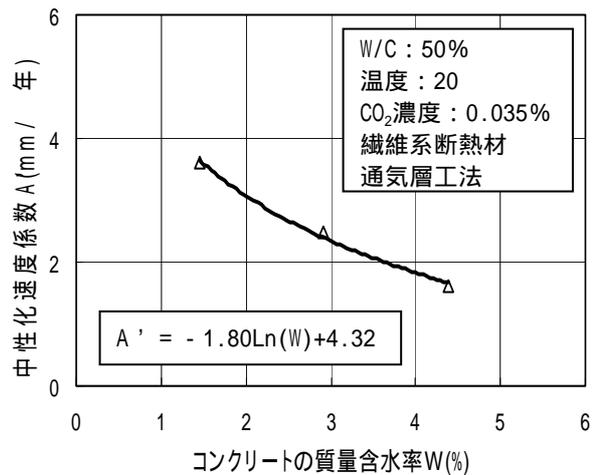


図 2 外断熱建物躯体屋外側コンクリートの質量含水率と中性化速度係数の関係

ここに、

$A'$  : 中性化速度係数 (mm/年) 。

$W$  : コンクリートの質量含水率 (%) 。

## 4. 外断熱工法を考慮したコンクリートの質量含水率による中性化速度式

図 2 の結果を利用して、コンクリートの質量含水率、水セメント比、 $CO_2$  濃度、温度および外断熱工法の抑制効果などを含んだ一般中性化速度式を求める。

ここでは、コンクリートの中性化速度に及ぼす水セメント比、 $CO_2$  濃度および温度の影響については魚本らの研究結果<sup>4)</sup>により、屋外環境 ( $CO_2$  濃度 0.035%)、水セメント比 50%、温度 20 のときの各係数を、以下のように求める。

### (1) $CO_2$ 濃度による係数 $Kc$

魚本らの研究結果<sup>4)</sup>では、 $CO_2$  濃度  $C$  のときの係数  $K^*c$  は  $(2.804 - 0.847 \log C) \quad C$  で表し

ている。屋外側 CO<sub>2</sub>濃度 0.035% の場合は、 $K_c = 0.755$  になる。この屋外側を 1 としたとき、CO<sub>2</sub>濃度による係数  $K_c$  は以下ようになる。

$$K_c = [(2.804 - 0.847 \log C) \cdot C] / 0.755$$

$$= (3.71 - 1.12 \log C) \cdot C \quad (6)$$

ここに、

$K_c$ : 屋外側の CO<sub>2</sub>濃度を 1 としたときの CO<sub>2</sub>濃度による係数。

$C$ : CO<sub>2</sub>濃度(%) (0.035% ~ 100%)

### (2) W/C による係数 $K_{wc}$

魚本らの研究結果<sup>4)</sup>では、W/C による係数は  $(2.94WC - 101.2) \times 10^{-2}$  で表している。普通ポルトランドセメント使用の水セメント比 50% の場合は、 $K_{wc} = 0.458$  になる。この場合を 1 としたとき、W/C による係数  $K_{wc}$  は以下のようにになる。

$$K_{wc} = [(2.94WC - 101.2) \times 10^{-2}] / 0.458$$

$$= 0.064WC - 2.21 \quad (7)$$

ここに、

$K_{wc}$ : 水セメント比 50% を 1 としたときの W/C による係数。

$WC$ : 水セメント比(%) (30% ~ 80%)

### (3) 温度による係数 $K_T$

魚本らの研究結果<sup>4)</sup>では、温度による係数は  $e^{(8.478 - 2563/T)}$  で表している。この式は 20 を基準としており、20 のとき  $K_T = 1$  となっている。従って、温度による係数  $K_T$  はそのまま使用できる。

$$K_T = e^{(8.478 - 2563/T)} \quad (8)$$

ここに、

$K_T$ : 温度による係数。

$T$ : 絶対温度(K) (283K ~ 313K)

### (4) 外断熱工法躯体コンクリートの中性化速度予測式

コンクリートの中性化速度に及ぼす外断熱工法の影響について、著者らが明かにした外断熱工法による中性化抑制効果(文献<sup>1)</sup>の図4)より、外断熱工法による中性化抑制係数  $K_f$  を求めることができる。

コンクリートの中性化速度に及ぼす仕上げ材の影響について、和泉博士の研究結果<sup>5)</sup>の仕上げ材による係数を仕上げ材による中性化抑制係数  $K_f$  として使用する。

これまでコンクリートの中性化速度に及ぼす材料、調合、養生条件および環境条件などの影響について、かなり明らかにされてきた。これらの要因を含んだコンクリートの中性化速度式は、多くの研究者によって提案されているが、一般的には以下の式(9)のように、中性化深さ  $X$  は経過時間の平方根に比例するという式で表される。

$$X = A \sqrt{t} \quad (9)$$

ここに、 $X$ : 中性化深さ(mm)、 $A$ : 中性化速度係数、 $t$ : 経過時間。

中性化速度係数  $A$  については、影響する要因を考慮して、質量含水率による係数  $K_w$ 、CO<sub>2</sub>濃度による係数  $K_c$ 、W/C による係数  $K_{wc}$ 、温度による係数  $K_T$  および外断熱工法または仕上げ材による中性化抑制係数  $K_f$  を積にして求められる。従って、外断熱工法を考慮したコンクリートの質量含水率による一般的な中性化速度予測式は、以下のように表すことができる。

$$X = A \times \sqrt{t}$$

$$= K_w \times K_c \times K_{wc} \times K_T \times K_f \times \sqrt{t} \quad (10)$$

ここに、

$X$ : 中性化深さ(mm)

$t$ : 経過年数(年)

$K_w$ : コンクリートの質量含水率( $W$ )による係数(CO<sub>2</sub>濃度 0.035%、W/C 50%、温度 20 で、仕上げなしの場合)

$$K_w = -1.80 \ln(W) + 4.32$$

$W$ : コンクリートの質量含水率(%)  
( $W = 1.5\% \sim 5.4\%$ )

$K_c$ : CO<sub>2</sub>濃度による係数

$$K_c = (3.71 - 1.12 \log C) \cdot C$$

$C$ : CO<sub>2</sub>濃度(%) (0.035% ~ 100%)  
(屋内側の CO<sub>2</sub>濃度 0.1% の場合、 $K_c = 1.53$ )

$K_{wc}$  : W/C による係数

$$K_{wc} = 0.064WC - 2.21$$

WC : 水セメント比 ( % ) ( 30% ~ 80% )

$K_T$  : 温度による係数<sup>4)</sup>

$$K_T = e^{(8.478 - 2563/T)}$$

T : 絶対温度 ( K ) ( 283 K ~ 313 K )

$K_f$  : 外断熱工法, 仕上げ材による中性化抑制係数 ( 屋外側 : 表 3 より, 屋内側 : 表 4 より )

表 3 各外断熱工法の中性化抑制係数  $K_f$ <sup>1)</sup>

外断熱工法の種類		中性化抑制係数 $K_f$	
・発泡系断熱材 ・密着工法	押出法ポリスチレンフォーム	0.00	
	ビーズ法ポリスチレンフォーム	0.06	
・繊維系断熱材 ・非通気層工法	石綿セメント押出成形板	塗装なし	0.32
		ウレタン塗料塗装	0.07
	繊維混入珪酸カルシウム板	塗装なし	0.93
		防水型透湿塗材塗装	0.20
	ドロマイト混入モルタル	塗装なし	0.97
		防水型透湿塗材塗装	0.20
・繊維系断熱材 ・通気層工法		1.00	

表 4 コンクリート表面仕上げ材の中性化抑制係数  $K_f$ <sup>5)</sup>

部位	仕上げ材の種類	中性化抑制係数 $K_f$
屋内側	仕上げなし	1.00
	プaster	0.73
	塗装	0.61
	モルタル + プaster	0.49
	モルタル	0.48
	タイル	0.31
	人造石	0.31
	モルタル + 塗装	0.19

### 5. 既往予測式との比較

コンクリートの中性化進行について, これまでいくつかの中性化速度予測式が提案されている。これらの式は, 促進中性化試験、自然暴露実験ならびに実建物調査により, セメントと骨材・混和剤の種類, 水セメント比, 施工程度,  $CO_2$  濃度, 相対湿度, 温度, 仕上げ材および屋内

外の違いなどを考慮して, それぞれ提案されたものである。

既往の魚本式<sup>4)</sup>, 和泉式<sup>5)</sup>, 白山式<sup>6)</sup>, 依田式<sup>7)</sup>および著者らの予測式によりコンクリートの中性化深さと経過年数の関係を試算すると, 図 3 に示す結果が得られた。著者らの予測式は既往の予測式と比較するため, コンクリートの乾燥程度を考慮して, 例として, 普通ポルトランドセメント, 混和材なし, 水セメント比 65%, 仕上げなし, 施工は普通程度,  $CO_2$  濃度 0.035%, 相対湿度 60%, 温度 20 の屋外側という同じ条件である。この結果によれば, 経過年数に伴って, コンクリートの中性化深さの予測値は, 著者らの予測式が質量含水率 3.5% の場合, 依田式よりやや小さいが, 白山式よりはやや大きく, 質量含水率 4.0% の場合, 白山式よりやや小さく, 質量含水率 4.5% の場合, 和泉式よりやや大きくなることを示している。

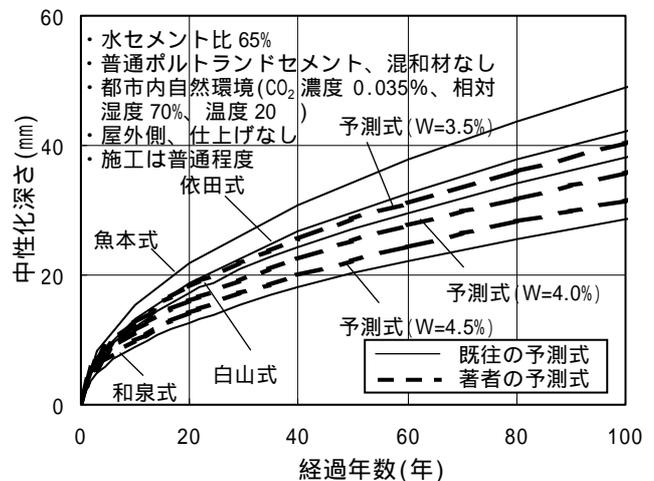


図 3 予測式と既往の中性化速度予測式との比較

### 6. 予測式による算定値と実建物調査による実測値の関係

無断熱建物(経過年数 15 年, 仕上げなし)外壁コンクリートの中性化深さと質量含水率の調査結果を表 5 に示す。

普通ポルトランドセメントを用い, 水セメント比 65%, 仕上げなし, 屋外側  $CO_2$  濃度 0.035%, 温度 20 ) の場合, 本研究の予測式を用いて,

表5 外壁コンクリートの中性化深さと  
中性化領域の質量含水率の調査結果

部 材 部 位	質量含水率 (%)	中性化深 さ (mm)	中性化速度係数 (mm/ 年)
外 壁 屋外側	4.8	10	2.6
	2.7	25	6.5
	4.2	12	3.1
	3.3	21	5.4
外 壁 屋内側	4.8	8	2.1
	4.5	15	3.9
	5.2	6	1.6
	5.0	11.0	2.8

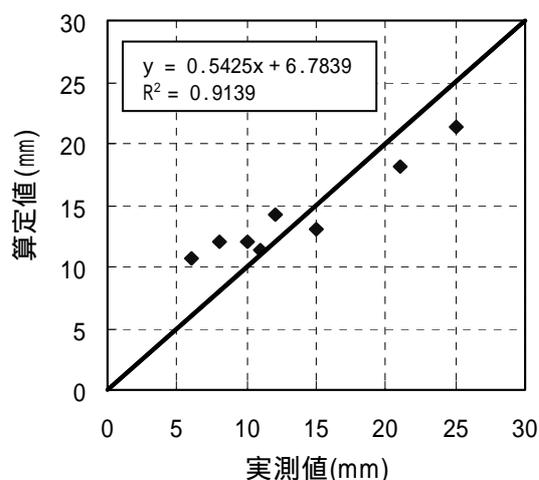


図4 質量含水率を考慮した中性化深さの  
予測式による算定値と実測値の比較

表5に示している質量含水率と対応したコンクリートの中性化深さの算定値と表5の実測値との関係を、図4に示す。

図4によれば、提案した予測式(10)により算定した中性化深さは、実測した中性化深さの値と比較的よい相関性を示している。

## 7. まとめ

本研究は、コンクリートの乾燥程度を考慮した外断熱建物躯体の中性化速度予測式を求めたもので、以下のようにまとめられる。

(1) 中性化速度予測式を提案するため、既往の研究文献を基にして、コンクリートの質量含水率と中性化速度の関係を求めた。また、コンクリートの中性化速度に及ぼす水セメント比、CO<sub>2</sub>濃度および温度による各係数を求めた。

(2) 外断熱工法によるコンクリートの中性化抑制係数および乾燥程度(質量含水率で表す)を考慮した建物躯体の中性化速度予測式を提案した。

(3) 既往の予測式と提案した予測式の経過年数に伴うコンクリートの中性化深さを比較考察して、提案した予測式の位置付けを明らかにした。

(4) 実建物の調査によって、コンクリートの乾燥程度を考慮した予測式により算定した中性化深さの値は、実測した中性化深さの値との間に比較的よい相関性を示していることを確認した。

## 参考文献

- 1) 申雪寒, 長谷川寿夫: 外断熱建物躯体コンクリートの中性化に関する研究, 日本建築学会技術報告集, 第20号, pp.59~62, 2004.12
- 2) 大岸佐吉, 楊静: 促進法によるコンクリートの長期中性化推定の試み, セメント・コンクリート, .533, pp.41~48, 1991
- 3) 依田彰彦, 横室隆: コンクリートのケミカルレジスタンスに関する研究(その2 草津温泉水による浸漬したコンクリートについて), 日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸), pp.191~192, 1983
- 4) 魚本健人, 高田良章: コンクリートの中性化速度に及ぼす要因, 土木学会論文集, 451/V-17, pp.119~127, 1992
- 5) 和泉意登志: コンクリートの中性化速度に基づいた鉄筋コンクリート建築物の耐久性設計手法に関する研究, 大阪大学学位論文, 1991.12
- 6) 白山和久: コンクリートの調合設計, 調合管理, 品質検査指針案・解説, 日本建築学会, 1976
- 7) 依田彰彦: セメント・コンクリート, No.429, pp.26~32, 1982