

コンクリートの中性化に関する解析的研究

その2 空隙特性を反映した拡散複合則に基づく \sqrt{t} 則の導出

212-056 小西 和仁

1. はじめに

本研究その2は、コンクリートの中性化において、相対湿度の影響を加えた \sqrt{t} 則の中性化速度係数を複合則でモデル化し、 CO_2 と水分の非定常拡散方程式と炭酸化反応をFEMで数値解析した先駆的で優れた研究と認識されている既往文献が、実は、相対湿度の影響を加えた中性化速度係数の複合則モデル化に対して間違っていることを見だし、その間違いを正した合理的な中性化速度係数の算定方法を提示することを目的としている。

2. 既往文献の中性化速度係数のモデル化の概要

既往文献では、相対湿度を考慮した \sqrt{t} 則の中性化速度係数を、1) 水和反応を考慮した相組成モデルによるセメントペーストの空隙形成と、2) 細・粗骨材の各吸水率から換算した空隙状況と、3) 直列バネと並列バネを組み合わせた複合則を適用した拡散係数の算定と、4) 空気中の CO_2 濃度とコンクリートの空隙状況を組み合わせたコンクリート表面 CO_2 濃度の算定から、その1で示した \sqrt{t} 則の第1近似解の中性化速度係数に代入して適用している。

3. 既往文献の中性化速度係数のモデル化の間違いと合理的なモデルの検討

既往文献では、2章で示した1)~4)の各項目で間違いや不整合があり、ここでは、正しいモデルを検討した。これ以降、既往文献に由来する不整合式や間違い式は、文献第1著者の前田式の名前を付ける。

3.1 硬化セメントペーストとコンクリートの空隙率計算の不整合

図1に硬化セメントペーストとコンクリートの空隙率計算の不整合と正しいモデルの結果を示す。水和度を材齢に対して図中のように変化させると、相組成モデル解析から、硬化セメントペーストとコンクリートの空隙率が計算できる。前田式は、硬化セメントペーストとコンクリートで、毛管空隙容積とゲル孔容積の取り扱いに不整合があり、それを整合させると、中性化が顕在化する長期材齢で計算結果に大きな相違があることがわかる。

3.2 骨材吸水量計算の間違い

図2に骨材吸水量計算の間違いと正しいモデル結果の差を示す。前田式の $(1 - \text{骨材吸水率 } Q_a\%/100)$ は、骨材の空隙を除いた岩石分正味率となる。単位骨材量が絶乾状態の場合、単位骨材絶乾量 $[\text{kg}/\text{m}^3] \times (1 - \text{骨材吸$

水率 $Q_a\%/100)$ で、骨材の空隙部分を除いた正味の岩石分の単位量となる単位岩石分正味量 $[\text{kg}/\text{m}^3]$ が算定でき、これに誤って骨材吸水率を掛けて単位骨材吸水量を求めようとしたのかもしれないが、これは、単位岩石分正味量がすでに空隙を除いているため吸水できない状態にあり、吸水率を掛けて吸水量を求める行為が間違いになる。また、単位骨材量が表乾状態の場合、単位骨材表乾量 $[\text{kg}/\text{m}^3] \times (1 - \text{骨材吸水率 } Q_a\%/100)$ で、水隙を含む表乾骨材の岩石分正味量を換算しようとしたのかもしれないが、この対応は骨材吸水率の計算定義に合っておらず間違いになる。

間違いの前田式と正しいモデル結果との差から、細骨材率が大きくなるほど間違いの影響が大きく現れる。

3.3 複合則による CO_2 拡散係数計算の間違い

図3に既往文献で対応していた複合則によるコンクリ

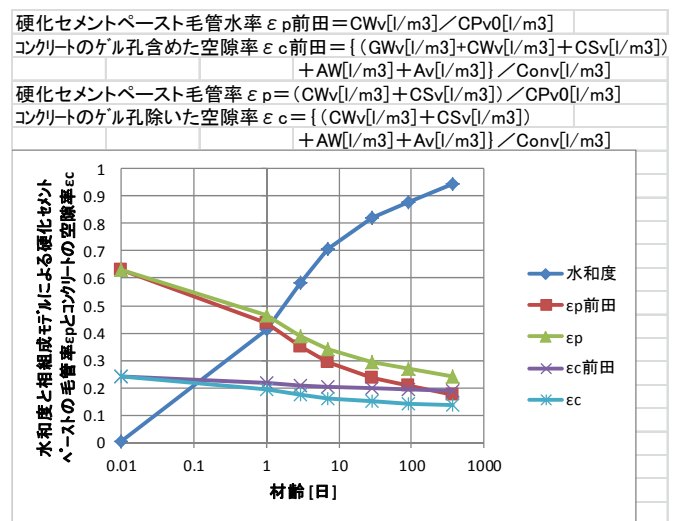


図1 硬化セメントペーストとコンクリートの空隙率計算の不整合と正しいモデルの結果

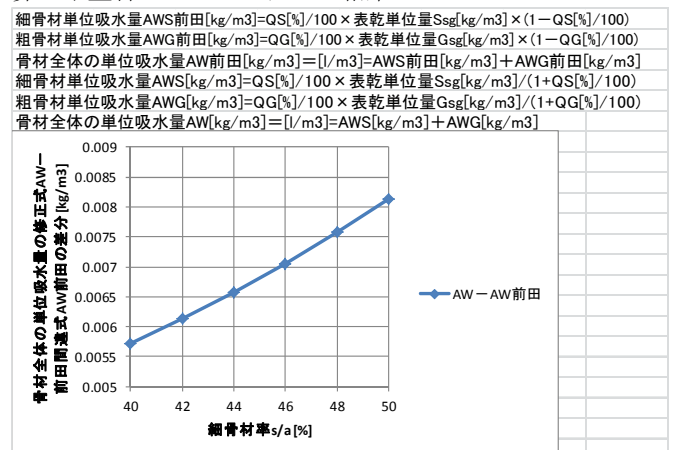


図2 骨材吸水量計算の間違いと正しいモデル結果の差

(f) Mehlum-Kernのモデル

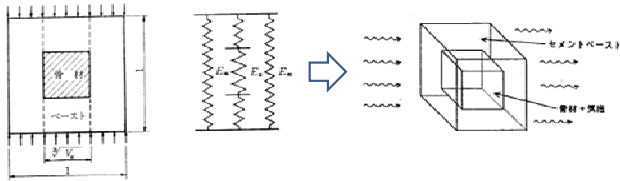


図3 複合則によるコンクリートのCO₂拡散係数の概要

CO₂拡散係数[cm²/日] 硬化セメントDp 851.3501 骨材Da 42.01084
 骨材と空気量合わせた容積率Vaa=(Sv[l/m³]+Gv[l/m³]+Av[l/m³])/Conv[l/m³]
 直列バネ合成成分の逆数1/Ddc前田=((Vaa)^(1/3))/Da+(1-((Vaa)^(1/3)))/Dp
 複合則CO₂拡散係数D前田[cm²/日]=Ddc前田*((Vaa)^(2/3))+Dp*(1-((Vaa)^(2/3)))
 直列バネ合成成分の逆数1/Ddc=((Vaa)^(2/3))/Da+(1-((Vaa)^(2/3)))/Dp
 複合則CO₂拡散係数D[cm²/日]=Ddc*((Vaa)^(1/3))+Dp*(1-((Vaa)^(1/3)))

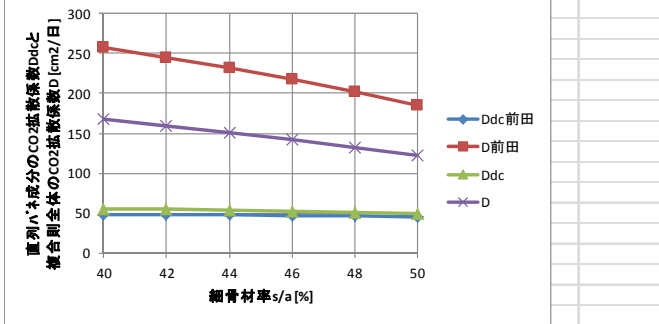


図4 直列バネと並列バネを組み合わせた複合則の間違いと正しいモデルの結果

ートのCO₂拡散係数の概要を示す。複合則は直列バネと並列バネを組み合わせたメーメルとカーンのモデルになっているが、これを正しく導出すると、既往文献中に記載の前田式と異なっていることがわかった。

図4に直列バネと並列バネを組み合わせた複合則の間違いと正しいモデルの結果を示す。正しいモデルの結果は、間違いの前田式の約1/4程度になっており、前田式は中性化進行が正しいモデルよりもかなり速い。

3.4 空気中のCO₂量計算の間違い

図5に空気中CO₂量計算の間違いと正しいモデルの結果を示す。前田式では、大気中のCO₂濃度率と空気密度の積で、大気中のCO₂量を計算しているが、これは間違いになる。例えば、CO₂濃度率を100%とすると、空気はCO₂成分だけになり、この場合CO₂密度の値が正しい解になるが、前田式だと空気密度の値になってしまう。促進中性化試験等でCO₂濃度が高くなった中性化環境では、中性化進行の結果で誤差が大きくなる。

4. 中性化深さ計算での前田間違い式と修正式の比較

3章で指摘した前田間違い式と正しいモデルの修正式とを中性化深さの計算を通して比較する。

表1に中性化深さの計算条件を示す。W/C=55%で単位水量170kg/m³の一般的なコンクリート条件とした。

図6と表1中に前田間違い式と正しいモデルの修正式による中性化深さの比較結果を示す。修正式(フィック拡散第1近似式)は、前田間違い式よりも小さく、AIJ耐久設計指針式に近い結果になっていることがわかる。

空気1m³中のCO前田[kg/m³]=乾き空気密度1.3[kg/m³]*(rCO₂[vol%]/100)
 空気1m³中のCO[kg/m³]=CO₂密度1.97[kg/m³]*(rCO₂[vol%]/100)

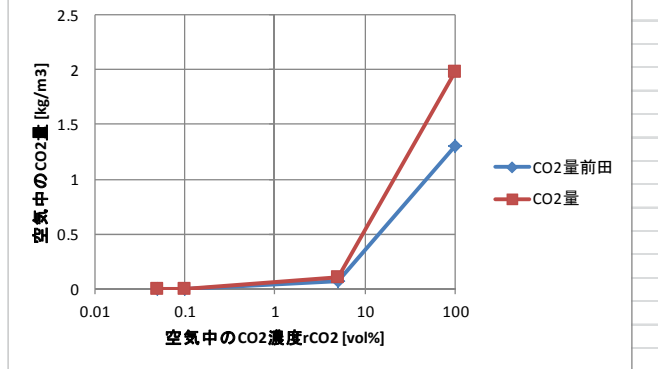


図5 空気中CO₂量計算の間違いと正しいモデルの結果

表1 中性化深さの計算条件と各間違い項目の計算結果

計算条件	水セメント比W/C	0.55	粗骨材	表乾密度[ρ/cm ³]	2.6
	空気量AIR [vol%]	4.5	細骨材	吸水率[%]	1
	単位水量[kg/m ³]	170	粗骨材	表乾密度[ρ/cm ³]	2.6
	単位粗骨材量[kg/m ³]	920		吸水率[%]	2
	細骨材率 s/a [%]	48.4847		中性化開始時t _t の水和度X	0.8
	CO ₂ 濃度rCO ₂ [vol%]	0.039		外気の相対湿度H[%RH]	80
前田1989年論文の間違い項目			前田間違い	修正式	
①硬化セメントとエンクリートの有効空隙率の計算	硬化セメントの毛管率ε _p	0.246529	硬化セメントの相対湿度考慮の有効空隙率ε _{pe}	0.300406	0.060081
	エンクリートの空隙率ε _c	0.198652	エンクリートの相対湿度考慮の有効空隙率ε _{ce}	0.151633	0.066327
②骨材の有効空隙率の計算	細骨材の単位吸水量AWS[kg/m ³]	16.9712	粗骨材の単位吸水量AWG[kg/m ³]	16.9779	9.108
	骨材全体の単位吸水量AW[kg/m ³]	26.0792	骨材の空隙率ε _a	26.0869	0.014603
	骨材の相対湿度考慮の有効空隙率ε _{ae}	0.002921	骨材の相対湿度考慮の有効空隙率ε _{ae}	0.002921	0.002965
③複合則によるエンクリートのCO ₂ 拡散係数の計算	硬化セメントのCO ₂ 拡散係数D _p [cm ² /日]	698.6632	骨材のCO ₂ 拡散係数D _a [cm ² /日]	851.3501	41.38495
	複合則の直列バネ合成成分の逆数1/D _{dc}	0.021917	複合則の直列バネ合成成分の逆数1/D _{dc}	0.019552	0.021917
	エンクリートのCO ₂ 拡散係数D[cm ² /日]	168.3133	エンクリートのCO ₂ 拡散係数D[cm ² /日]	130.2201	168.3133
④エンクリート表面部のCO ₂ 量C _{0con} の計算	CO ₂ 量 モル質量 C ₀ [mol/cm ³]	1.74E-08	CO ₂ 量 kg質量 C ₀ [kg/m ³]	1.6E-08	0.000766
	エンクリート表面の単位体積あたりCO ₂ 量C _{0con} [mol/cm ³]	1.32E-09	エンクリート表面の単位体積あたりCO ₂ 量C _{0con} [mol/cm ³]	1.08E-09	1.32E-09
⑤フィック法則第1近似の中性化速度係数	a[cm/√日]	0.021314	a[cm/√日]	0.016833	0.021314
	a[cm/√年]	0.407201	a[cm/√年]	0.321589	0.407201

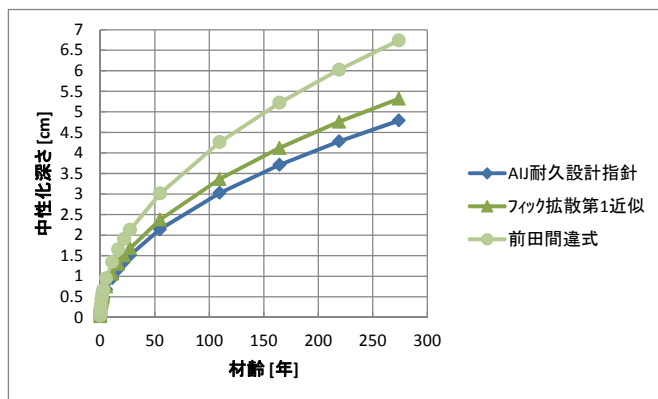


図6 前田間違い式と正しいモデルの修正式による中性化深さの比較結果

5. まとめ

本研究その2では、中性化について優れた研究と認識されている既往文献の間違いを見だし、その間違いを正した合理的な中性化速度係数の算定方法を提示することができた。

参考文献 1) 前田孝一：コンクリートの中性化の数値解析に関する研究，日本建築学会構造系論文報告集，No.402，pp.11-19，1989.8

(中村研究室)