

論文 コンクリートの熱特性を活用した既設構造物の物質拡散性状評価に関する研究

小根澤 淳志*1・加藤 佳孝*2・矢島 哲司*3・魚本 健人*4

要旨：近年各種非破壊検査手法の開発が精力的に行われている。しかし、コンクリートの耐久性に関わる品質情報（塩化物イオン拡散係数など、以下 Cl^- 拡散係数）を予測するような手法は殆ど提案されていない。そこで本研究では、コンクリート中の劣化因子の移動と熱の移動に関連性があると考えられることに着目し、空隙量の違いから生じる熱移動特性の違いから、耐久性に関する品質情報である Cl^- 拡散係数を予測する手法の開発を行った。そして、おおむね $W/C=40\sim 60\%$ に対して適用できることが分かり、その予測精度は、鋼材腐食発生時間で $\pm 24\%$ の誤差であることがわかった。

キーワード：赤外線法, 非破壊検査, コンクリートの品質, Cl^- 拡散係数

1. はじめに

コンクリート構造物の維持管理が困難である要因に、施工後のコンクリートの品質 (Cl^- 拡散係数 etc.) を定量的に評価できないことがあげられる。著者らはこれまでに、コンクリート中の劣化因子の移動と熱の移動が、移動現象のアナロジーにより、数学的に同様に扱えることに着目し、両者の関連性を検討することで、赤外線法により施工後のコンクリートの品質を定量的に評価できる手法の開発を行ってきた。そのなかで、粗骨材量を一定にした場合、温度パラメーターの違いとして水セメント比の違いを検出できることが明らかとなった¹⁾。

しかし、本提案手法の適用範囲、特に本提案手法において、異なる配合にもかかわらず同じ温度パラメーターになるような場合について検討しておく必要がある。しかし、実構造物の配合は様々であり、全ての配合に対して熱物性値を測定することは、現実的ではない。一般に、コンクリート全体の熱物性値は、コンクリートの構成材料（セメント硬化体、コンクリート中の空隙、細骨材、粗骨材）の個々の熱物性値を

体積比で重み付けして平均化したものに等しい、という熱物性の加算則が成立すると言われている²⁾（以下、加算則）。この加算則が精度良く成立すれば、任意の配合のコンクリートに対して解析的に本手法の適用範囲を検討することができる。そこでまず内部に熱電対を配置した供試体を用いて実験的にコンクリートの構成材料の熱物性値を算出し、加算則の精度に関して検討を行い、空隙率と s/a を変化させた配合に対して本手法の適用範囲を解析的に検討した。さらに、この結果を受け、21配合のコンクリートを用いて、赤外線カメラによって取得した表面温度情報から算出した温度パラメーターより Cl^- 拡散係数を予測する場合の適用範囲と予測誤差に関して検討を行った。

2. 熱移動特性からのアプローチ

2.1 熱物性の加算則の概念

例えば、熱伝導率に加算則が成立するとした場合は式(1)のようになる。

$$\lambda_c = V_{hp} \lambda_{hp} + V_v \lambda_v + V_s \lambda_s + V_G \lambda_G \quad (1)$$

*1 芝浦工業大学大学院 工学研究科建設工学専攻 (正会員)

*2 東京大学生産技術研究所 都市基盤安全工学国際研究センター 講師 博士 (工学) (正会員)

*3 芝浦工業大学 工学部土木工学科 教授 工博 (正会員)

*4 東京大学生産技術研究所 都市基盤安全工学国際研究センター 教授 工博 (正会員)

表-1 配合

	記号	W/C(%)	s/a(%)	S/C	W (kg/m ³)	C (kg/m ³)	S (kg/m ³)	G (kg/m ³)
ペースト	P50	50	-	-	608	1216	-	-
モルタル	M50	50	-	2.7	152	304	831	-
コンクリート	C40	40	45	2.4	146	365	875	1097
	C50sa40	50	40	2.4	160	320	777	1197
	C50sa45	50	45	2.7	160	320	875	1097
	C50Vp30	50	45	2.2	179	359	789	995

表-2 熱物性の測定結果

	P50	M50	C40	C50sa40	C50sa45	C50Vp30
λ (W/m・K)	0.963	1.433	2.250	2.139	1.820	2.064
D (m ² /h)	0.00110	0.00110	0.00325	0.00300	0.00272	0.00276
空隙率 (%)	36.90	16.87	11.20	11.92	13.74	13.71

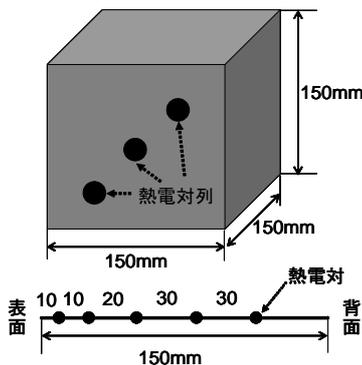


図-1 供試体概要図

ここに、 λ_i :各材料の熱伝導率(W/m・K)、(h_p :セメント硬化体、 V :空隙、 S :細骨材、 G :粗骨材)、 V_i :コンクリート中の各材料の体積割合(%)

このように、個々の構成材料の熱伝導率を体積比で重み付けて平均化したものの和がコンクリートの熱伝導率に等しいとする。熱拡散率に関しても、同様な考え方をを用いる。比熱に関しては、式(2)より算出する。

$$D = \frac{\lambda}{\rho C} \quad (2)$$

ここに、 D :熱拡散率(m²/h)、 λ :熱伝導率(W/m・K)、 ρ :密度(kg/m³)、 C :比熱(J/(kg・K))

2.2 実験概要

先に述べた加算則の概念を用いてセメント硬化体、細骨材、粗骨材の熱物性を算出するため



写真-1 測定装置

写真-2 加熱状況

に、W/C=50%のペースト、W/C=50%,S/C=2.7のモルタル、ペースト量を単位体積の25%としたW/C=50%,s/a=40%のコンクリートを作製した。また、加算則の検証用にW/C=40%,W/C=50% s/a=45%のコンクリート、ペースト量を単位体積の30%としたW/C=50%,s/a=45%のコンクリートを作製した。全ての配合において、スランブは10±2cm、空気量は5±0.5%となるようにした。配合表を表-1に示す。供試体内部には、内部温度変化を測定するために熱電対を配置した。供試体の概要を図-1に示す。これらの供試体について、熱伝導率、熱拡散率、空隙率の測定を行った。熱伝導率に関しては、写真-1に示す装置を用いて、10回測定し平均値を採用した。熱拡散率に関しては、写真-2に示すように加熱面以外を断熱し、一定温度で加熱できるホットプレートを用いて1時間加熱し、その間の内部温度を熱電対により測定した。式(3)により熱拡散率を算出した¹⁾。

$$C(x,t) = C_0 \left(1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{D \cdot t}} \right) \quad (3)$$

ここに、C:任意の場所、時間における温度(°C),
C₀:表面温度(°C)

また、空隙率の測定は ASTM C642-97 に準拠して行った。

2.3 測定結果と構成材料の熱物性値の算出

まず、測定結果を表-2 に示す。セメントペーストはセメント硬化体と空隙により構成されるとして、セメント硬化体の熱伝導率、熱拡散率を算出した。ここで、空隙は空気満たされるとして、一般的な空気の熱物性値(熱伝導率:0.0241(W/m・K), 比熱:1007(J/kg・K), 密度:1.293(kg/m³))を用いた。熱伝導率を例にとると、式(4)のようになる。

$$\lambda_{hp} = \frac{\lambda_p - V_v \lambda_v}{V_{hp}} \quad (4)$$

ここに、 λ_p :ペーストの熱伝導率(W/m・K)

次に、セメント硬化体の熱物性値を用いて、モルタルの熱物性値の測定結果から細骨材の熱伝導率と熱拡散率を算出した。最後に、セメント硬化体の熱物性値と細骨材の熱物性値を用いて、コンクリートの熱物性値の測定結果から粗骨材の熱伝導率と熱拡散率を算出した。算出結果を表-3 に示す。表-3 の算出結果を用いて、C40, C50sa45, C50Vp30 の熱物性値を予測した。実測値と予測値の関係を図-2, 図-3 に示す。これによると、熱伝導率も熱拡散率もほぼ精度良く予測できていると考えられる。

2.4 適用範囲の検討

本提案手法を適用するにあたっては、異なる配合にもかかわらず同じ温度パラメーターとなるような配合の組み合わせが存在することが考えられる。そこで、加算則を用いて任意の配合における熱物性値を予測し、熱伝導解析の結果から温度パラメーターを算出することで、本提案手法での予測可能範囲を検討した。

ここで、時間パラメーターと温度パラメーター

表-3 熱伝導率、熱拡散率の算出結果

λ_{hp} (W/m・K)	λ_s (W/m・K)	λ_G (W/m・K)	D_{hp} (m ² /h)	D_s (m ² /h)	D_G (m ² /h)
1.512	1.853	3.106	0.00155	0.00119	0.00548

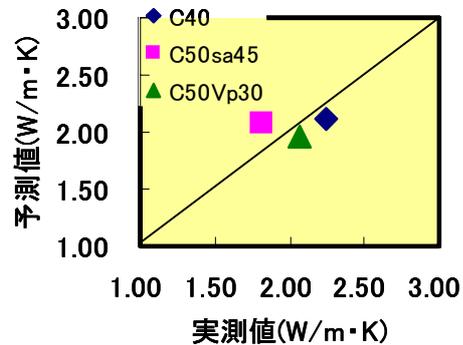


図-2 熱伝導率の実測値と予測値

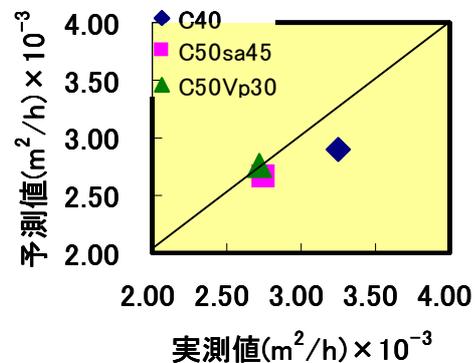


図-3 熱拡散率の実測値と予測値

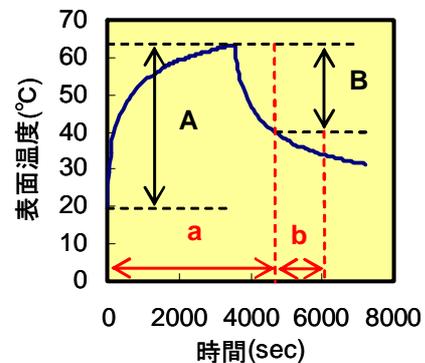


図-4 時間パラメーターと温度パラメーターの概念図

—¹⁾の定義を式(5), 式(6)に示す(記号は図-4中)。

$$\text{時間パラメーター} = \frac{b}{a} \quad (5)$$

$$\text{温度パラメーター} = \frac{B}{A} \quad (6)$$

加算則を用いて W/C=40%,50%のコンクリートの s/a と空隙率を変化させた任意の配合に対して熱伝導率，熱拡散率，密度を予測し，解析により得られた表面温度から温度パラメーターを算出した。結果を図-5 に示す。

まず，水セメント比の違いに関してであるが，W/C=40%の温度パラメーターは全て 0.52 以上にあり，W/C=50%の温度パラメーターは全て 0.518 以下にあることを考えると，既往の論文¹⁾に記したように水セメント比の違いに関しては評価できることがわかる。また，空隙量の違いや s/a の違いといった細かな配合の違いも，予測が可能であることが考えられる。しかし，図中に示すように異なる配合にもかかわらず，同じ温度パラメーターを示す配合が存在するため，このような場合は本手法では適切な予測ができない可能性がある。しかし，Cl⁻拡散係数が空隙量の違いや s/a の違いといった細かな配合の違いを反映せず，同程度の値を示すのであれば，本手法により Cl⁻拡散係数を予測することができる。つまり，配合の違いが，Cl⁻拡散係数に対してどの程度有意な差を有するかということを検討することで，本手法の適用範囲を特定することができるものとする。

3. 物質移動からのアプローチ

2.4 より，同じ温度パラメーターとなる配合の存在が確認された。熱の移動は加算則に従うので熱移動特性は空隙率の違いのみの影響を受けると考えられる。しかし，Cl⁻の移動は，空隙率の違いの他に移動経路の影響を受ける。そのため，同じ温度パラメーターを示す配合においても経路が異なれば，Cl⁻移動特性は異なるため，予測結果に誤差が生じると考えられる。そこで，表-4 に示すような 21 配合のコンクリートを用いて，温度パラメーターから Cl⁻拡散係数を予測する場合の適用範囲と予測誤差に関して検討を行った。

3.1 実験概要

配合は W/C=30,40,45,50,55,60,70%， s/a=35,

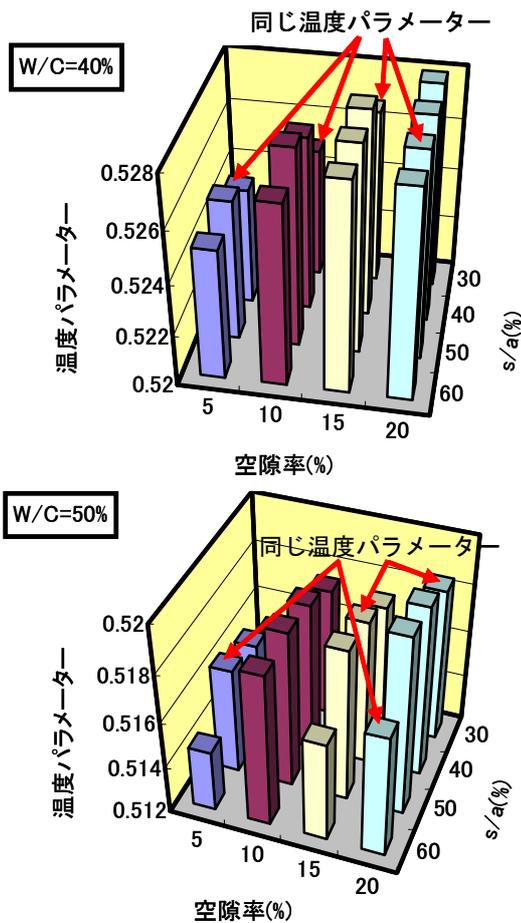


図-5 配合の違いと温度パラメーター

表-4 配合

W/C(%)	s/a(%)	W (kg/m ³)	C (kg/m ³)	S (kg/m ³)	G (kg/m ³)
30	35	121	402	646	1232
	45	121	402	831	1042
	55	121	402	1015	853
40	35	138	346	646	1232
	45	138	346	831	1042
	55	138	346	1015	853
45	35	146	324	646	1232
	45	146	324	831	1042
	55	146	324	1015	853
50	35	152	304	646	1232
	45	152	304	831	1042
	55	152	304	1015	853
55	35	157	286	646	1232
	45	157	286	831	1042
	55	157	286	1015	853
60	35	162	271	646	1232
	45	162	271	831	1042
	55	162	271	1015	853
70	35	171	244	646	1232
	45	171	244	831	1042
	55	171	244	1015	853

45, 55%とし，空気量はできるだけ 5.5±1%となるようにした。熱移動特性実験と Cl⁻移動特性実験を同一の品質のコンクリートで行うために，供試体は図-6 に示すように 1 体のコンクリート

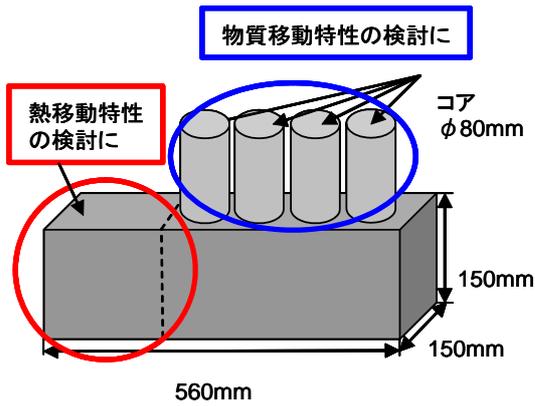


図-6 供試体概要図

から切り出して作製した。熱移動特性実験用の供試体については、2.2と同様に断熱、加熱を行い、放熱過程の表面温度を赤外線カメラにより撮影し、表面温度の下降が緩やかになる時間パラメーターが0.5の時の温度パラメーターを算出した。温度パラメーターの算出にあたっては、供試体の各端部から5cmを除いた部分の温度を平均化したものを用いた。Cl⁻移動特性実験は、図のようにコアを採取したものを電気泳動によるコンクリート中の塩化物イオンの実効拡散係数試験方法(案)(JSCE-G571-2003)に準拠して測定を行い、実効拡散係数を算出した。

3.2 測定結果と考察

図-7に実効拡散係数と温度パラメーターの関係を示す。これによると、実効拡散係数と温度パラメーターは非常にばらついたものとなり1対1に対応しないことが分かる。そこで、図-8、図-9に示すように実効拡散係数および温度パラメーターが測定誤差であると思われる配合(図中白色)を除外し、W/C=30~60%に絞り込むと図-10のようになる。ある程度の誤差範囲で、温度パラメーターと塩化物イオンの実効拡散係数を関連付けられると考えられる。これを実用的な配合であるW/C=40~60%に絞り込んだものが図-11である。図中の実線は図-10の近似直線である。これを平行移動し、誤差範囲を算出したところ、予測誤差は±0.31(cm²/年)であった。2.4で検討したように、同程度の温度パラメーターを示す場合でも、異なる実効

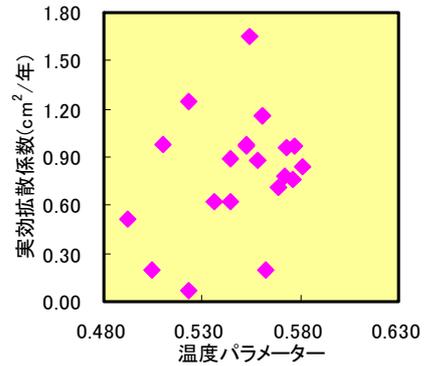


図-7 実効拡散係数と温度パラメーターの関係

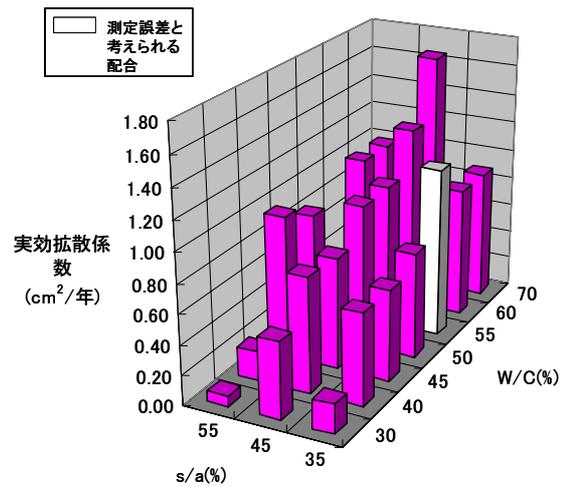


図-8 測定誤差であると思われる配合(実効拡散係数)

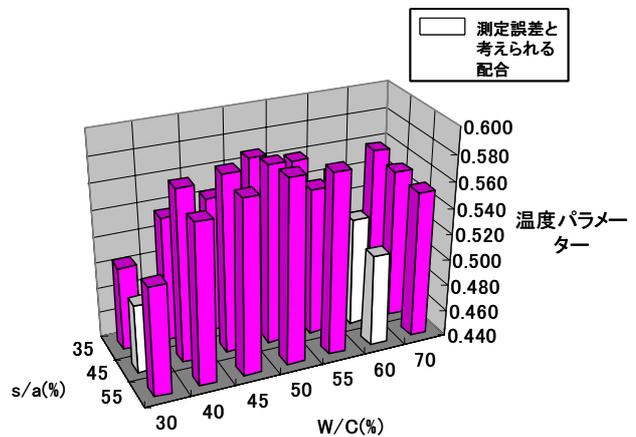


図-9 測定誤差であると思われる配合(温度パラメーター)

拡散係数を示す配合が見られる。しかし、その誤差は予測誤差以下であることが分かる。そこで、汀線付近でのW/C=50%の構造物を例にとり、W/C=50%、s/a=45%の供試体の温度パラメーターを図-10の近似直線に代入し、実効拡散係数を算出し(以後、平均値)、これと予測誤差

の $0.31(\text{cm}^2/\text{年})$ を加えたもの（以後、近似直線による予測値+ $0.31=\text{Max}$ ）に対して、鋼材腐食発生時間を示方書の算定式³⁾（式(7)）にて算出した。

$$C_d = \gamma_{cl} \cdot C_0 \left(1 - \text{erf} \left(\frac{0.1 \cdot c}{2\sqrt{D_d \cdot t}} \right) \right) \quad (7)$$

ここに、 C_d :鋼材位置における塩化物イオン濃度の設計値(kg/m^3)、 C_0 :コンクリート表面における想定塩化物イオン濃度(kg/m^3)、 c :かぶりの期待値(mm)、 t :塩化物イオンの侵入に対する耐用年数(年)、 γ_{cl} :鋼材位置における塩化物イオン濃度の設計値 C_d のばらつきを考慮した安全係数、 D_d :塩化物イオンに対する設計拡散係数($\text{cm}^2/\text{年}$)

式(8)にて変動係数を算出すると、鋼材腐食発生時間 $\pm 24\%$ の誤差で推定可能であることが分かった。

$$\text{誤差} = \frac{\text{Maxによる予測値} - \text{平均値による予測値}}{\text{平均値による予測値}} \times 100 \quad (8)$$

4. まとめ

- 1) 本研究の範囲内では加算則は精度良く成立している。
- 2) 解析より、配合が異なるにもかかわらず、同じ温度パラメーターとなる配合が存在し、予測精度が低下する可能性があることが分かった。
- 3) 本研究の範囲内では、温度パラメーターから実効拡散係数を予測できる配合の範囲は実用的な範囲であった。
- 4) 有効拡散係数を予測する際の誤差は、 $\pm 0.31(\text{cm}^2/\text{年})$ 、鋼材腐食発生時間の誤差に換算すると、 $\pm 24\%$ であった。

謝辞

本研究は東京大学生産技術研究所魚本研究室にて行った。ここに記して感謝の意を表す。

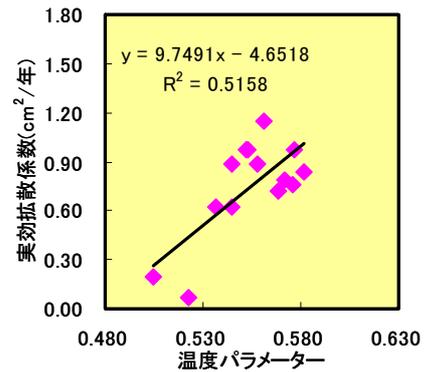


図-10 修正後の実効拡散係数と温度パラメーターの関係

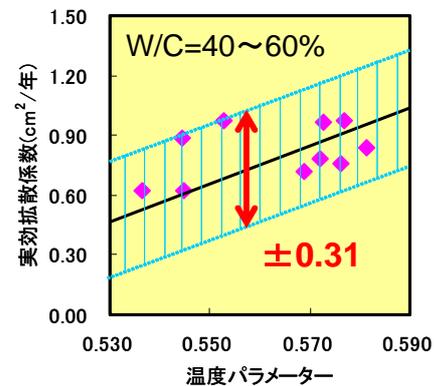


図-11 推定誤差範囲(W/C=40~60%)

参考文献

- 1) 小根澤淳志・加藤佳孝ら：赤外線法を用いたコンクリート部材内の材料分布評価に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.1，pp.1751-1756，2003
- 2) 川口徹，榎田佳寛：コンクリートの熱伝導率，熱拡散率，比熱の測定方法とその応用，マスコンクリートの温度応力発生メカニズムに関するコロキウム論文集，日本コンクリート工学協会，pp.11-14，1982
- 3) (社)土木学会：2002年度制定 コンクリート標準示方書 [施工編]，土木学会，pp.24-28，2002