

# 論文 異なる養生下での各種コンクリート材料の空隙構造変化に基づく物質移動解析

半井 健一郎<sup>\*1</sup>・石田 哲也<sup>\*2</sup>・李 春鶴<sup>\*3</sup>・三浦 廣高<sup>\*4</sup>

**要旨**：提案する熱力学連成解析手法により、各種ポルトランドセメントおよびフライアッシュと高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートに関して、水和、空隙構造形成、水分分布の各事象を計算することで、異なる養生環境下で達成される物質移動抵抗性を検討した。水分逸散挙動については、養生を全く行わない場合を除き、一定の精度が確認された。酸素拡散係数に関しては、十分な水中養生を行った場合には実験結果をおおむね良好に再現できるが、材齢初期に乾燥を受けた後の拡散係数の増大は十分には再現されなかった。

**キーワード**：養生, 混和材, 拡散係数, 逸散水量, 乾燥, 熱力学, 数値解析

## 1. はじめに

コンクリートは、若材齢から乾燥条件下に曝した場合には、十分な水分供給をした場合に比べ、強度や透水性や透気性などの物質透過抵抗性が低下する<sup>1)</sup>。実構造物の耐久性能評価には、材齢初期の養生の影響を定量的に把握することが重要になる。養生の影響の程度はセメント種類や混和材料によって異なるため、材料や配合の違いを評価することも求められる。

著者らは、任意の環境条件下における各種コンクリート材料の性能予測を目的に、熱力学連成解析システム DuCOM の開発を進めている<sup>2),3)</sup>。本研究では、材齢初期の養生条件が物質移動抵抗性に与える影響評価について、解析手法の適用性を検討する。最近の研究により、各種ポルトランドセメントや混合セメントの水和モデル<sup>4)</sup>や空隙構造モデル<sup>5)</sup>の精度が向上しつつあることから、混和材等の違いに着目した検討も行う。

## 2. 熱力学連成解析システム<sup>2),3)</sup>

### 2.1 システムの概要

熱力学連成解析システムは、水和反応、空隙構

造形成、水分分布の各事象の連成計算を基礎とし、長期の炭酸化、鉄筋腐食などの材料劣化現象を追跡するものである。ここでは、液状水、水蒸気、酸素、二酸化炭素、イオンの移動が、空隙構造に立脚した熱力学モデルにより計算されている<sup>2),3)</sup>。材齢初期に乾燥を受ける環境条件に関しても、低水セメント比配合コンクリートにおける水分逸散現象などを中心に検証実績を積み重ねてきた<sup>2)</sup>。高水セメント比配合のコンクリートについては、養生を全く行わない場合は逸散水量を過小評価するものの、水中養生を 1, 3, 28 日行った後に乾燥させた場合には実験結果を良く再現することが確認されている<sup>3)</sup>。

### 2.2 水分移動モデル

水分移動現象として、液状水および水蒸気の圧力および温度勾配を駆動力とする移動が定式化されている。まず、空隙中の間隙水圧差による液状水移動は、空隙構造に関して液状水流束を積分することにより求められる。液状水移動係数 $K_l$ は次式により計算される。

$$K_l = \frac{\rho_l \phi_e^2}{50\eta} \left( \int_0^r r dV \right)^2 \quad (1)$$

ここで、 $\rho_l$ : 液状水密度[kg/m<sup>3</sup>],  $\phi_e$ : 有効空隙率,  $\eta$ :

\*1 群馬大学 大学院工学研究科社会環境デザイン工学専攻講師 博士(工学) (正会員)

\*2 東京大学 大学院工学系研究科社会基盤学専攻准教授 博士(工学) (正会員)

\*3 群馬大学 大学院工学研究科社会環境デザイン工学専攻助教 博士(工学) (正会員)

\*4 東京大学 大学院工学系研究科社会基盤学専攻修士課程

液状水の粘性である。有効空隙は、空隙構造形成モデルにおいて水和の進行等を考慮して計算される毛細管空隙とゲル空隙の和とし、層状構造のC-S-Hゲルの層間に形成される微細な層間空隙は物質移動の場から除外している。

次に、Fickの拡散則に支配される相対湿度差による水蒸気移動は、空隙構造の屈曲や連結性、飽和度等により、見かけ上の水蒸気拡散が減少することを考慮して計算される。水蒸気移動係数  $K_v$  は次式により計算される。

$$K_v = \frac{\rho_v \phi_e D_0}{\Omega} \int_{r_c}^{\infty} \frac{dV}{1+N_k} \left( \frac{M_w h}{\rho_l RT} \right)^2 \quad (2)$$

ここで、 $\rho_v$ : 飽和水蒸気密度[kg/m<sup>3</sup>],  $D_0$ : 自由空間における水蒸気拡散係数[m<sup>2</sup>/sec],  $\Omega$ : 空隙の屈曲を表すパラメータ(= $\pi/2$ )<sup>2</sup>),  $N_k$ : Knudsen 数である。

### 2.3 酸素移動モデル

酸素移動現象の定式化においては、気体および溶存酸素の両者が考慮されている。気体酸素の移動機構として、分子拡散と Knudsen 拡散を考慮し、相対的に影響の小さな表面拡散は無視している。気体酸素拡散係数  $D_{gO_2}$  は次式で計算される。

$$D_{gO_2} = \frac{\phi_e D_0^g (1-S_e)^4}{\Omega (1+N_k)} \quad (3)$$

ここで、 $D_0^g$ : 自由空間における気体酸素拡散係数[m<sup>2</sup>/s],  $S_e$ : 有効空隙の飽和度である。

### 3. 異なる養生下での水分逸散挙動

フライアッシュコンクリートにおける水分移動の検討として、水分逸散実験を取り上げる。解析対象は、表-1に示すフライアッシュ置換率 30% (W/B=33%) および 50% (W/B=36%) のコンクリートである<sup>6)</sup>。養生なし、湿潤養生 1, 7, 28 日後に、温度 30°C 湿度 40% の乾燥条件下での重量変化から、水分逸散量を計測した。試験体は直径 47mm 高さ 100mm の円柱で、上面のみを開放している。置換率 30% に関しては、検証内容を別紙<sup>3)</sup>に報告している。

解析結果と実験結果の比較を図-1, 2に示す。養生を行わなかった場合には、逸散水量を過小評価するが、1 日以上の上湿潤養生を行った場合には

表-1 コンクリートの配合<sup>6)</sup>

No.	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
	W	C	FA	S	G
FA30	182	382	164	692	871
FA50		250	250		

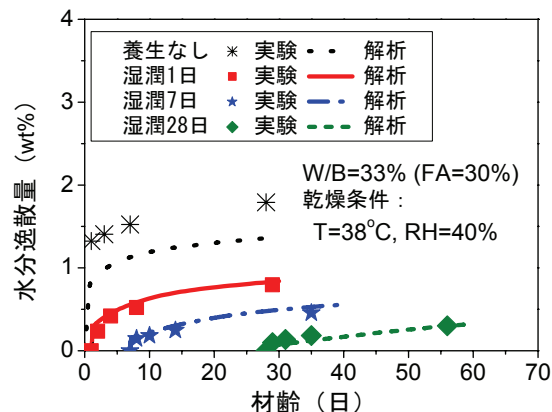


図-1 水分逸散量 (FA30)

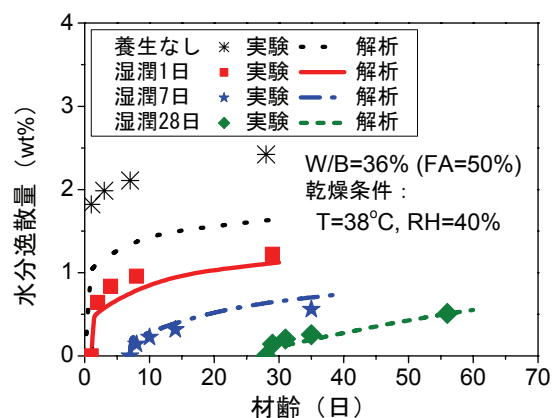


図-2 水分逸散量 (FA50)

解析結果は実験結果を良好に再現していると言える。乾燥開始が早くなるほど、開始時の空隙構造が粗大であり、また、水分逸散によりその後の水和進行が阻害されるために空隙構造が緻密化することができず、逸散水量が増加した。置換率増加による逸散水量の増加は、フライアッシュの反応進行が緩慢であるために若材齢時の空隙構造が粗大となることで表現されている。なお、養生を行わなかった場合の過小評価の原因には、凝結開始前の水分逸散による構造変化やマイクロクラックの発生など、本解析では考慮していない要因が考えられる。逆

に、1 日以上の湿潤養生という最低限の養生を行った場合には、水和進行による空隙構造変化のみを考慮することで、水分逸散現象に及ぼす乾燥の影響を評価できたとと言える。

#### 4. 異なる養生による酸素拡散係数変化

##### 4.1 酸素の拡散実験

本章では、小林・出頭によるコンクリート中の酸素の拡散性状に関する実験<sup>1)</sup>を取り上げ、解析モデルにおける拡散係数算定手法の適用性に関して検討する。多岐の実験項目のうち、本論文では、水セメント比、含水率、結合材種類、養生条件の影響に関する検討を行う。

まず、普通ポルトランドセメント(OPC)を用い、材齢 28 日までの水中養生を行った試験体について、水セメント比および含水率の拡散係数への影響を検討する。解析対象としたコンクリートの配合を表-2に示す。酸素拡散係数の実験および解析結果の比較を図-3に示す。水セメント比 70%および40%において、実験結果に比較して解析結果が若干小さくなる傾向があるが、全体としては、解析結果と実験結果はおおむね良好に一致しているといえる。すなわち十分に養生を行った試験体に対しては、解析手法が高い精度を有していることが改めて確認された。この後の検討対象である水セメント比 60%に関しては、含水率の影響について、特に良好に再現されている。水セメント比 70%の実験に関しては、解析では考慮していない材料分離の影響により、実験における拡散係数が増大した可能性も考えられる。なお、解析では、水セメント比の増加により拡散係数がゆるやかに増加する傾向が計算されているが、実験では明確ではない。

次に、結合材種類および養生条件の検討を行う。水結合材比を 60%一定とし、OPC に加え、早強ポルトランドセメント(HPC)、中庸熟ポルトランドセメント(MPC)、OPC の 30、60%を高炉スラグ微粉末(SG)で置換したもの(SG30、SG60)、20%をフライアッシュ(FA)で置換したもの(FA20)の 6 種類の拡散係数が測定された。打設後 1 日間の湿布養生し、翌日脱型した後材齢 28 日までの養生条件は、下記

の 3 種類であった。

- 1)水中養生
- 2)材齢 7 日まで水中養生後、気中養生(50%RH)
- 3)気中養生(50%RH)

養生温度はいずれも 20℃であった。所定の養生期間を終了した試験体の含水率が 60%になるように調整を行った後、拡散係数が測定された。空隙率も計測されている。コンクリートの配合を表-3に示す。

空隙率に関する実験値と解析値の比較を図-4にまとめた。物質透過に寄与する有効空隙率の直接的な比較が必要ではあるが、実験における有効空

表-2 コンクリートの配合<sup>1)</sup>

No.	W/C	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )			
		W	C	S	G
OPC40	40	195	488	987	755
OPC50	50		390	997	827
OPC60	60		325	870	889
OPC70	70		279	971	946

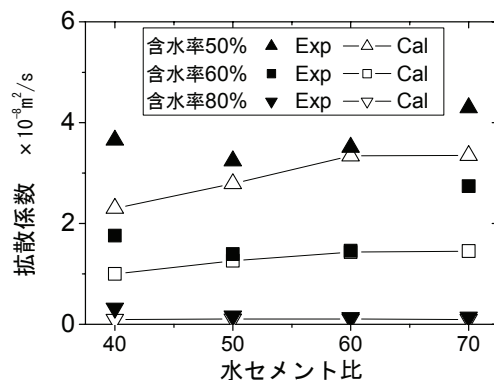


図-3 W/Cによる酸素拡散係数変化 (OPC)

表-3 コンクリートの配合 (W/B=60%)<sup>1)</sup>

No.	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					
	W	C	SG	FA	S	G
OPC	205	342	0	0	870	967
HPC	209	348	0	0	844	977
MPC	205	342	0	0	872	970
SG30	205	239	103	0	866	963
SG60	205	137	205	0	862	960
FA20	195	260	0	65	878	976

隙率の定義や測定が困難であることから、ここでは解析における層間空隙率も含めた空隙率の比較を行った。本実験における 105℃ 絶乾による空隙率計測は、解析モデルにおいて定義する層間空隙を含めた細孔空隙率と合致する。ここで空気量は含まず、解析値には材齢 28 日の値を用いた。MPC では解析値が実験よりも若干大きくなり結合材種類の傾向も異なったが、全体としては解析結果と実験結果と十分に整合していると言える。養生条件の違いを検討している HPC については、養生による空隙率変化を実験よりも解析ではやや過大に評価したが、その差はそれほど大きくなかった。

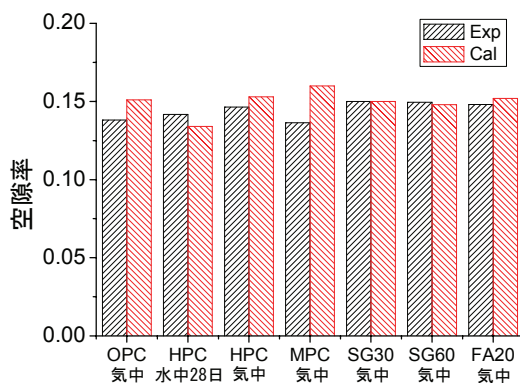


図-4 空隙率の比較

図-5～図-10 には、酸素拡散係数における養生の影響に関して、結合材種類ごとの実験および解析結果の比較を示す。図中には、材齢 28 日時点での平均水和度  $\alpha_{cal}$  の解析値をあわせて記した。ここで平均水和度は、セメント中の各鉱物および混和材の反応率の平均値である。28 日間の十分な水中養生を行った場合には、結合材の種類によらず、解析値は実験結果をおおむね良好に再現した。水中養生における結合材による差は、実験同様、解析でもほとんど確認されなかったが、高炉スラグ微粉末を混合した場合には拡散係数がやや増加する傾向が得られた。これは、解析では高炉スラグ微粉末を用いると、層間空隙といった微細な空隙が計算上増加するためである。水分平衡では小径空隙から水で満たされるため、同一含水量を示したとしても、比較的粗大な空隙に水分は残らず、有効空隙内の飽和度が低下するのである。ただし、空隙変化の妥当性

に関しては、現在検討中である。気中養生を行った場合には、実験では、水中養生よりも拡散係数が増加し、乾燥条件へ暴露する材齢が早くなるほど傾向が顕著になっている。対する解析結果では、乾燥による水和反応の停滞により、気中養生の拡散係数がわずかに増加しているものの、実験のような大幅な増加や乾燥開始材齢による明確な差は再現されなかった。なお、SG60 では、水中養生 28 日と 7 日で実験結果にほとんど差がなく、水中 7 日の解析結果が実験結果を上回ったことは今後検討が必要である。実験において 7 日以降の乾燥により総空隙率に関してはおよそその解析精度が確認されたことから、養生が十分ではないコンクリートの酸素拡散係数の予測には、空隙分布や幾何学的構造、連結性といった空隙特性の評価が必要と考えられる。

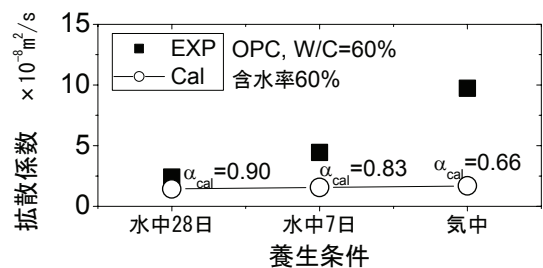


図-5 養生による酸素拡散係数変化 (OPC)

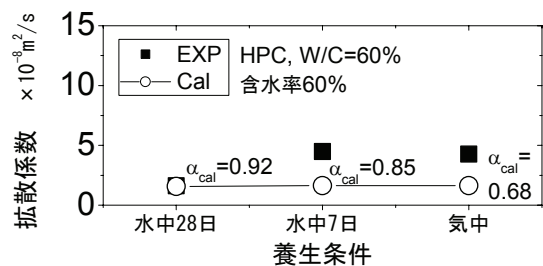


図-6 養生による酸素拡散係数変化 (HPC)

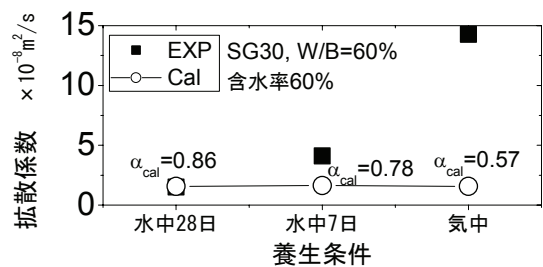


図-7 養生による酸素拡散係数変化 (MPC)



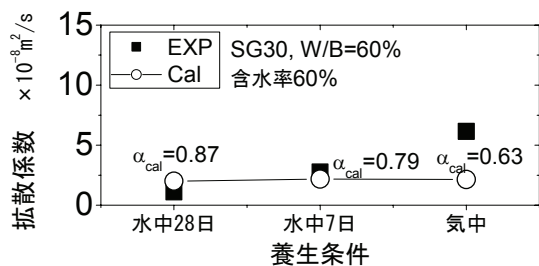


図-8 養生による酸素拡散係数変化 (SG30)

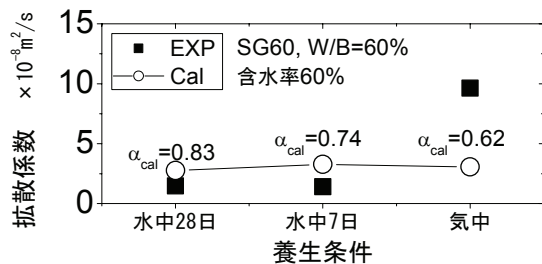


図-9 養生による酸素拡散係数変化 (SG60)

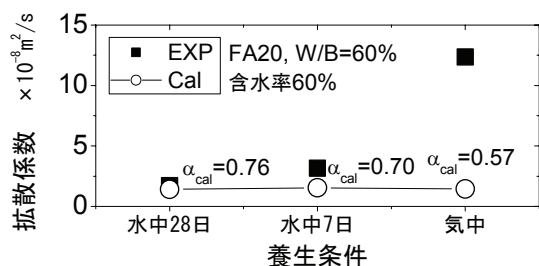


図-10 養生による酸素拡散係数変化 (FA20)

#### 4.2 気中養生における拡散係数増大の可能性

ここでは、前節の比較検討に基づき、気中養生において拡散係数増大をもたらす要因の可能性について、検討を行う。数値解析モデルにおける検討であることから、モデルの仮定の上立った議論となるが、実験では直接的に抽出することが困難あるいは行われていない要因に関して影響の可能性を検討することで、本解析手法の今後の精緻化のみならず、現象一般の理解の深化に努めるものである。

本検討における拡散係数の算出は式(3)により、有効空隙率、屈曲度、飽和度が主たるパラメータである。それぞれの変化が拡散係数へ及ぼす影響は、有効空隙率では線形、屈曲度では逆数、飽和度では非線形である。たとえば飽和度50%から10%増加すれば拡散係数は約50%に低下、10%低下すれば約175%に増加し、飽和度の感度が最も高いこと

が分かる。一方で、それぞれのパラメータにおける変動の可能性も異なり、また、相互に依存する。以下ではパラメータごとに可能性を検討する。

##### (1) 有効空隙率

本検討では、有効空隙率そのものではなく、総空隙率についてのみ実験結果との比較を行い、解析値のおおよその妥当性を確認するに留まった。層間空隙の割合によっては、有効空隙率が変化する可能性はあるが、今回の検討対象における総空隙率に占める層間空隙率の割合の解析値は、10～30%程度であり、有効空隙率そのものの算出誤差による拡散係数への影響は大きくはないと思われる。一方で、乾燥期間中に生じるマイクロクラックの影響により空隙構造が粗大化するとの指摘<sup>7)</sup>もあり、この場合には物質移動経路が大きく変化する可能性もある。解析中の有効空隙率に加えて屈曲度にも影響を及ぼすと考えられるが、現時点ではその影響を考慮していない。3章で示したような養生を全く行わない場合の水分逸散現象の検討を含め、マイクロクラックに関する検討が必要となる可能性もある。

##### (2) 屈曲度

本解析システムでは、屈曲度を定数として扱っているが、実際には値が変化している可能性もある。たとえば、空隙率が大きくなると屈曲度は小さくなるのが指摘されており、今回のように高水セメント比配合では空隙率が大きくなるため、特に乾燥により水和が停滞した場合には、水和が十分に進んでいるものと比較して屈曲度が小さい可能性がある。OPCにおける乾燥による拡散係数の実験結果と解析結果の差(図-5)を屈曲度のみで説明しようとすると、材齢1日で乾燥開始したものは1/5.7倍、材齢7日で乾燥開始したものは1/2.8倍にそれぞれ修正する必要がある。しかし、1/5.7倍すると、屈曲度は1.0を大きく下回ることになり、空隙の屈曲の程度を表現するとの屈曲度の定義には整合しない。

##### (3) 飽和度

今回検討対象とした実験の飽和度は十分に管理されており、図-3に示すように養生を適切に行った場合にはその影響が精度良く表現されている。一方で、空隙構造が変化した場合には、全体での飽

和度が同一であっても水分分布が異なるために、気体の拡散現象に及ぼす影響程度が異なる可能性もある。飽和度は解析における感度も高いことから、空隙構造変化とあわせて、検討を進める必要があると考えられる。

#### (4) 水分と気体の移動

今回の検討からは、水分と気体の移動に関する解析手法の適用性に違いが認められた。ここでは、解析において気体拡散係数を増加させた場合に、同じ変化を与えた水蒸気拡散現象が受ける影響を検討する。すなわち、図-5の乾燥による拡散係数増加に関する実験値と解析値の差と同じだけ水分逸散解析に用いる移動抵抗係数を大きく仮定し、感度解析を行う。対象は、過去に解析手法の検証<sup>3)</sup>に用いた逸散水量に関する実験<sup>6)</sup>とした。感度解析結果を図-11に示す。酸素拡散係数の増加に相当する変化を与えると、逸散水量が増加し、実験結果とは乖離することが分かる。水蒸気と気体酸素の拡散現象は、空隙中に存在する液状水の影響など、対象物質の違いによる移動のメカニズムの違いを含めた検討が必要となると考えられる。

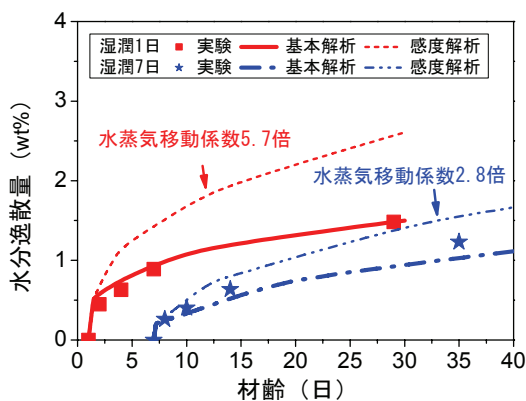


図-11 逸散水量に関する感度解析

#### 4. まとめ

提案する熱力学連成解析手法により、異なる養生条件下における各種ポルトランドセメントおよびフライアッシュと高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの物質透過抵抗性に関して、検討を行った。その結果、以下のことが示された。

1) 養生を全く行わなかった場合を除き、材齢初期に乾燥を受けたフライアッシュコンクリートの水分逸散

挙動を良好に再現できた。

2) 28日間の十分な水中養生を行った場合には、各種コンクリート材料の気体酸素拡散係数の実験値と解析値はおおよそ一致した。今後、拡散係数の算出に用いる有効空隙率や屈曲度自体の妥当性を検証することで、より詳細な分析が可能となる。

3) 材齢初期に乾燥を受けた後の拡散係数の増大は、現時点の解析では十分に再現できなかった。乾燥条件下における物質移動の詳細に関し、今後検討を進める必要がある。

#### 参考文献

- 1) 小林一輔, 出頭圭三: 各種セメント系材料の酸素の拡散性状に関する研究, コンクリート工学, Vol.24, No.12, pp.91-106, 1986.12
- 2) Maekawa, K., et al.: Multi-scale modeling of concrete performance -Integrated material and structural mechanics, Journal of Advanced Concrete Technology, 1(2) pp.91-126, 2003.
- 3) Ishida, T. et al.: Enhanced modeling of moisture equilibrium and transport in cementitious materials under arbitrary temperature and relative humidity history, Cement and Concrete Research, 37(4) pp.565-578, 2007.
- 4) 小田部裕一・岸利治: 複合水和発熱モデルにおける反応遅延と混合セメント内の相互依存性の評価, セメント・コンクリート論文集, No.58, pp.174-181, 2004.
- 5) 半井健一郎, 石田哲也: フライアッシュおよび高炉スラグ微粉末を混合したセメント硬化体の空隙構造形成モデル, 第59回セメント技術大会講演要旨, pp.12-13, 2005.
- 6) Cano-Barrita, P. F. de J. et al.: Moisture distribution in drying ordinary and high performance concrete cured in a simulated hot dry climate, Materials and Structures, Vol.37, pp.522-531, 2004.
- 7) 郭度連ほか: 乾燥によるコンクリート組織の不均質化, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.711-716, 2002.