

強度の異なるコンクリートの熱・湿気物性

その3 解析に用いた値が水分伝導率の推定値等に及ぼす影響

Relationship between Heat and Moisture Properties of Concrete and Strength

Part3. Influence of Parameter Values Used in Analysis

恩村 定幸*

要 旨

強度の異なるコンクリートについて熱湿気物性を測定し、それらを用いた熱水分同時移動方程式による数値解析によって水分化学ポテンシャル勾配に関する水分伝導率を推定した^{1)~7)}。その際、実測されていない湿気伝達率や湿気抵抗には文献値を、実測値にある程度のばらつきが見られた透水係数や平衡含水率には実測値の平均値を用いた。これら文献値の差異や実測値のばらつきが水分伝導率の推定値に与える影響について検討し、おおよその影響度を把握できた。また、水分伝導率の推定に用いた値に問題がないことを確認した。

キーワード：コンクリート／水分化学ポテンシャル／水分伝導率／熱水分同時移動

1. はじめに

コンクリート壁体内部における熱水分移動の様相を明らかにすることは、鉄筋コンクリート造建物の防露設計を的確に行う上で重要である。

近年の材料技術の進歩を鑑み、強度の異なるコンクリート (Fc27、Fc33、Fc40) について、熱水分移動に関する物性値 (熱伝導率、湿気伝導率、平衡含水率、透水係数) の測定を行ってきた。さらに、それらの実測値を用いて、水分化学ポテンシャル勾配に関する水分伝導率を気相水分と液相水分の伝導率に分離して推定する方法を示した。図-1 にその概要を示す。パラメータC1とC2は、図-2 および写真-1 に示す湿気伝導率の測定に関して、熱水分同時移動方程式を用いた解析を行い、水分流の計算値を実測値と比較することで決定した。さらに、吸水実

験 (写真-2) を行い、含水率変動の数値解析結果を実測値と比較することにより、推定した水分伝導率の妥当性を検証した^{1)~7)}。

前述の湿気伝導率の測定では図-3 に示すように、試験片の上面とピーカー内では湿気伝達 (α'_{out}) および湿気抵抗 (R') が考えられる。また、透水係数や平衡含

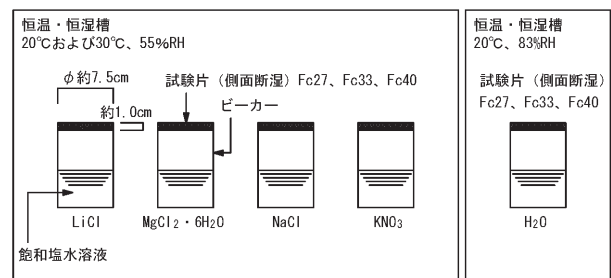


図-2 湿気伝導率測定の概要

※試験片に与えた水蒸気圧差 (Pa) と重量変化から求める水分流 ($\text{kg/m}^2\text{s}$) および試験片の厚さ (m) より湿気伝導率 (kg/msPa) を算定する

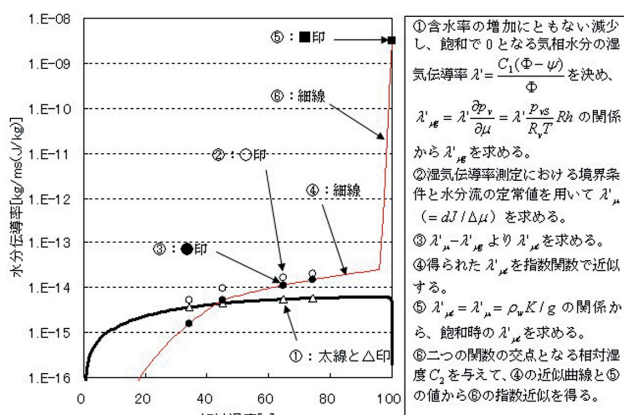


図-1 水分伝導率の推定方法



写真-1 湿気伝導率測定の状況

*建築研究グループ

水率の実測値にはある程度の幅のばらつきが見られた。解析では前者には文献値を、後者には平均値を用いている。

本報では、解析に用いたこれらの諸数値が水分伝導率の推定値に及ぼす影響について検討した結果を報告する。

2. 湿気伝達率および湿気抵抗の影響

図－3 から定常時の水分流は次式で表される。

$$J = \alpha'_{out} (pv_{out} - pv_1) \quad (1)$$

$$J = \lambda' (pv_1 - pv_2) / d \quad (2)$$

$$J = (pv_2 - pv_{in}) / R' \quad (3)$$

これらの関係より、

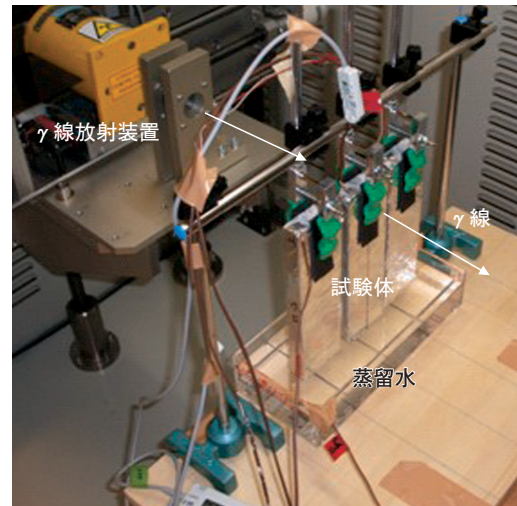
$$\lambda' = \frac{Jd}{pv_{out} - pv_{in} - (J / \alpha'_{out} + JR')} \quad (4)$$

すなわち、湿気伝達率および湿気抵抗が変わると得られる湿気伝導率（ λ' ）も変化する。

計算に用いた湿気伝達率および湿気抵抗の文献値を表－1 に示す⁸⁾。図－4 は、Fc27のコンクリートについて、計算から得られる湿気伝導率が、湿気伝達率または湿気抵抗の値を変化させたときにどのように変化するかを表した一例である（強度：Fc27、恒温・恒湿槽内温湿度：20℃、55%、ピーカー内の飽和塩水溶液が平衡する相対湿度：11%）。Aは、ピーカー内の湿気抵抗を一定にして試験片上面の湿気伝達率を変化させたときに得られる湿気伝導率を示す。Bは、試験片上面の湿気伝達率を一定にしてピーカー内空气の湿気抵抗を変化させたときに得られる湿気伝導率を示す。横軸は文献値を基準に湿気伝達率および湿気抵抗を何倍に変化させたかを表す。

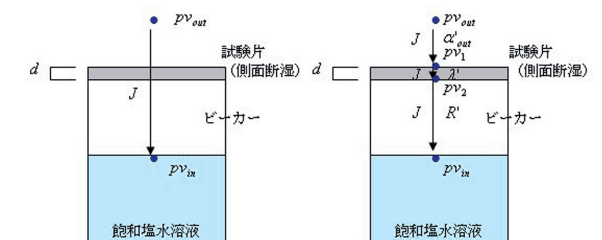
倍率1.0、すなわち湿気伝達および湿気抵抗を考慮することで得られる湿気伝導率は約1.07倍増加する。試験片上面の湿気伝達率を変えても得られる湿気伝導率は大きく変化しない（図－4 のA）。これは、湿気伝達率を抵抗に置き換えた場合、ピーカー内空气の湿気抵抗や試験体の湿気伝導抵抗に比べて最大でも1/10以下と小さいためである。ピーカー内空气の湿気抵抗を大きくしていくと、得られる湿気伝導率は大きくなる（図－4 のB）。これらの傾向はすべての測定（3 強度×9 条件）に共通している。

表－2 は、ピーカー内空气の湿気抵抗が文献値よりも小さい場合（文献値/3）と大きい場合（文献値×2）について得られる湿気伝導率の変化を表したもので、低湿



写真－2 吸水実験の状況

※ γ 線の放出量と透過量の測定値から材料の含水率を算定する

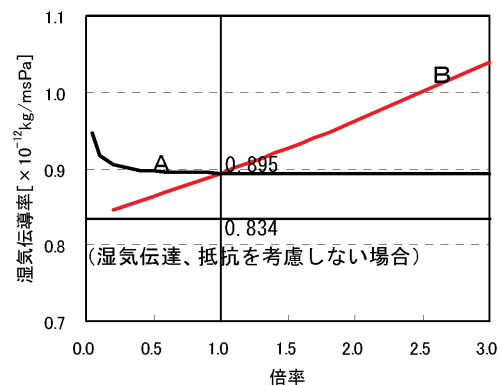


(1)湿気伝達および湿気抵抗を考慮しない場合 (2)湿気伝達および湿気抵抗を考慮する場合

図－3 湿気伝導率測定の解析モデル

表－1 計算に用いた湿気伝達率と湿気抵抗

室内側表面 水平面の 湿気伝達率	上向き湿流	24.4kg/m ² h(kg/kg') [4.16×10 ⁻³ kg/m ² sPa]
	下向き湿流	17.1kg/m ² h(kg/kg') [2.92×10 ⁻³ kg/m ² sPa]
気密空気層の 湿気抵抗	上向き湿流 厚さ144.8mm	0.241m ² h(kg/kg')/kg [1.41×10 ⁻³ m ² sPa/kg]
	下向き湿流 厚さ144.8mm	1.428m ² h(kg/kg')/kg [8.37×10 ⁻³ m ² sPa/kg]



図－4 湿気伝達率、湿気抵抗の影響

表－２ 湿気抵抗の影響（定常計算）

条 件		Fc27	Fc33	Fc40
20℃ 30℃	11_55、33_55 (下向き湿流)	0.94～ 1.12倍	0.95～ 1.08倍	0.97～ 1.06倍
20℃ 30℃	75_55、94_55 (上向き湿流)	0.99～ 1.02倍	0.99～ 1.02倍	0.99～ 1.02倍
20℃	100_83 (上向き湿流)	0.95～ 1.08倍	0.95～ 1.08倍	0.97～ 1.05倍

※数値は文献値を用いて得られる湿気伝導率に対する大きさを表す。

※11_55の11は、ピーカー内の飽和塩水溶液が平衡する相対湿度を、55は恒温・恒湿槽内の相対湿度を表す。

度から中湿度にかけて（11_55と33_55）影響が大きいのは、湿流が下向きであり、湿気抵抗の値が上向き湿流よりも6倍ほど大きいためである。高湿度域（100_83）の影響が大きいのは、湿流は上向だが、水分流が大きいためで、強度が低いほど影響が大きい理由と一致する。

また、ピーカー内空气の湿気抵抗を変えた場合、試験片内の水分化学ポテンシャルも変化するため、得られる水分化学ポテンシャル勾配に関する水分伝導率の推定値も変化する（図－1の②～④、⑥参照）。そして、この水分伝導率の差異が吸水実験における含水率変動の計算値にも影響を及ぼす。

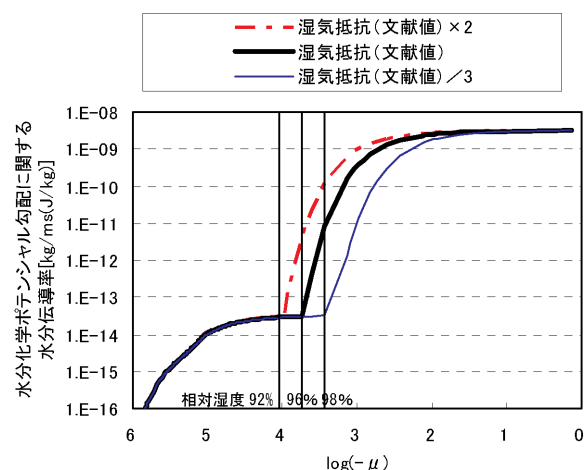
図－5(1)は、ピーカー内空气の湿気抵抗を変えた場合における水分化学ポテンシャル勾配に関する水分伝導率の推定値の計算結果である。図では差異を明確にするために、横軸に $\log(-\mu)$ を用いている。なお、解析方法等は既報^{5),6)}と同じである。

相対湿度90%程度までは数値の差は小さい（0.94～1.10倍）が、それ以上の湿度域では大きな影響が見られ、ピーカー内空气の湿気抵抗が大きいほど、試験片内の水分化学ポテンシャル差が小さくなるため水分伝導率は大きくなる。高い湿度域で大きな違いが見られるのは、液水移動によって水分流が増大するためと考えられる。

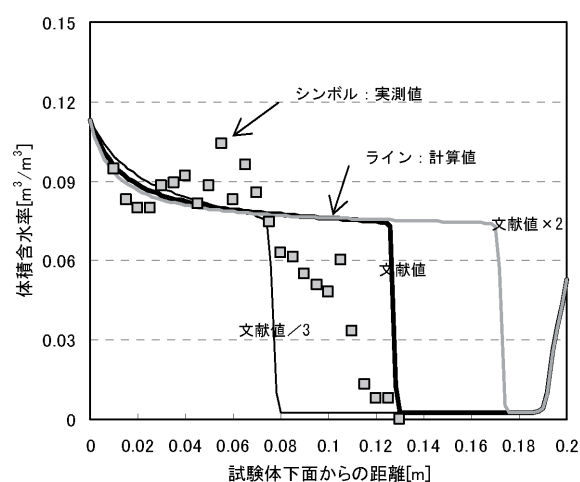
この水分伝導率の差異が吸水実験における含水率変動の計算値に及ぼす影響を図－5(2)に示す。なお、解析方法等は既報⁷⁾と同じである。湿気抵抗が大きいほど高い湿度域の水分伝導率が大きくなるため、含水率が速く増加する。また、文献値をそのまま用いた計算結果は、実測値と比較的良好一致している。

3. 実測値のばらつきの影響

透水係数の実測値は、平均値に対して0.55～1.40倍の範囲にあった。そこで、透水係数として小さい値（平均値×0.5）を用いた場合と大きい値（平均値×1.5）を用いた場合について検討を行った。



(1) 水分伝導率推定値の計算結果



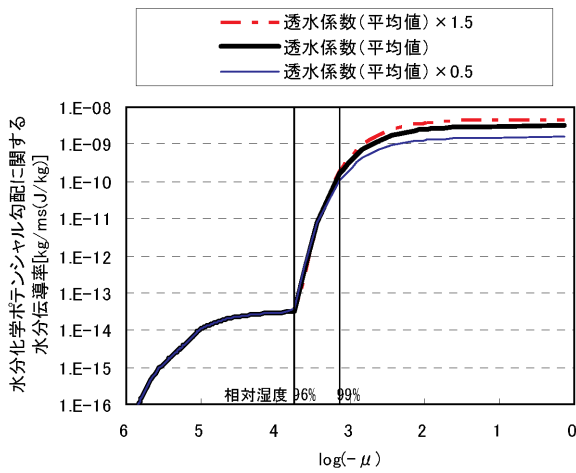
(2) 吸水実験における含水率分布の計算値と実測値との比較（実験開始116時間後）

図－5 湿気抵抗の影響

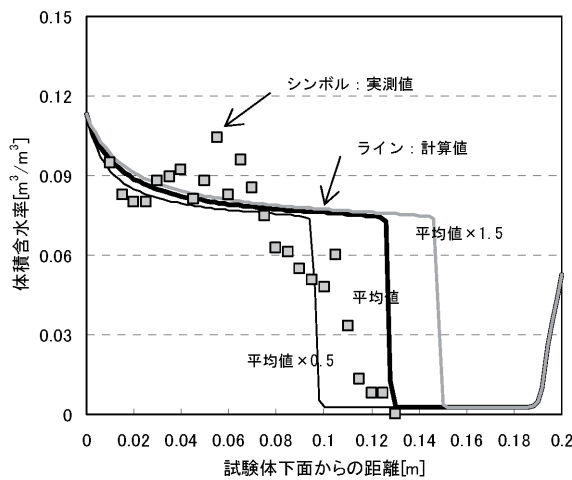
図－6(1)に水分化学ポテンシャル勾配に関する水分伝導率の推定値を示す。透水係数の違いによる差は相対湿度99%以上から顕著であり、透水係数が大きいほど水分伝導率は大きい。

図－6(2)に吸水実験における含水率変動の計算値と実測値との比較を示す。前述の湿気抵抗の場合と同様に、水分伝導率の値により含水率分布が変わるが、その影響は湿気抵抗の場合に比べて小さい。なお、平均値を用いた計算結果は、実測値と比較的良好一致している。

平衡含水率の実測値は、平均値に対して0.8～1.2倍の範囲にあった。そこで、平衡含水率曲線の近似に小さい値（平均値×0.8）を用いた場合と大きい値（平均値×1.2）を用いた場合について2種類の検討を行った。すなわち、図－7に示す2種類の近似曲線(a)と(b)を用いて解析を行った。

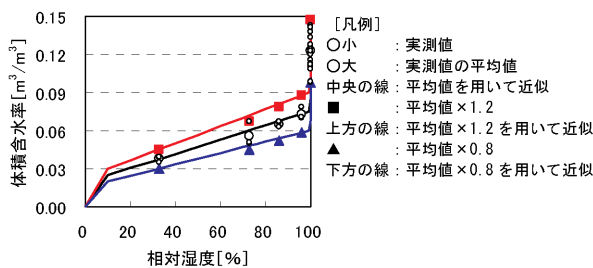


(1) 水分伝導率推定値の計算結果

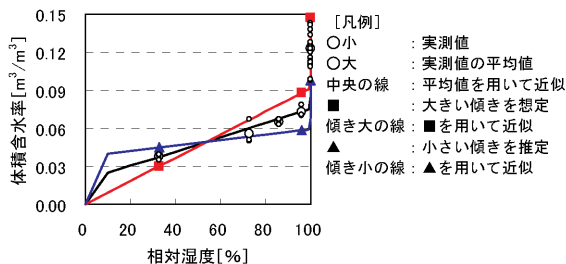


(2) 吸水実験における含水率分布の計算値と実測値との比較 (実験開始116時間後)

図-6 透水係数の影響



(a) 一律に平均値を0.8倍、1.2倍にした場合



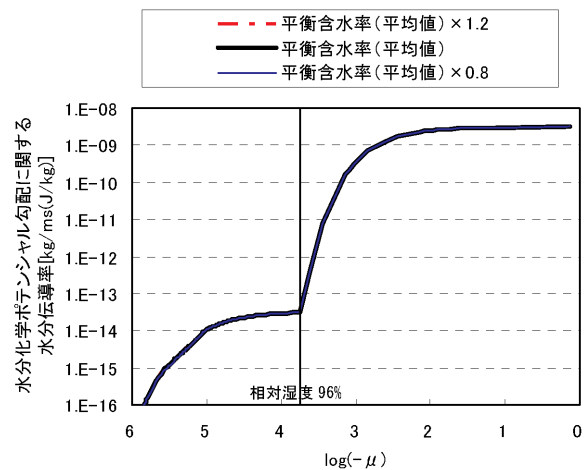
(b) 傾きが極端になるように近似した場合

図-7 計算に用いた平衡含水率の近似値

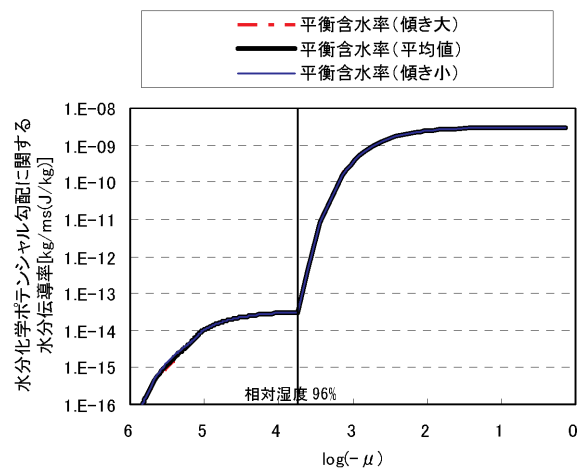
図-8(1)および図-8(2)に水分化学ポテンシャル勾配に関する水分伝導率の推定値を示す。傾きを極端に変えた場合でもばらつきの影響はほとんど見られない。

図-9(1)および図-9(2)に吸水実験における含水率変動の計算値と実測値との比較を示す。水分伝導率は平衡含水率の変化の影響をほとんど受けないが、吸水実験の解析結果は大きく影響を受ける。これは水分化学ポテンシャルの計算値が同じであっても、含水率に換算すると値が変わるためである。加えて、湿気容量の変化も影響している。前者の影響は縦軸方向、後者の影響は横軸方向の差異となって現われている。

なお、平均値を用いた計算結果は、透水係数、平衡含水率のいずれの場合も実測値と比較的良く一致している。

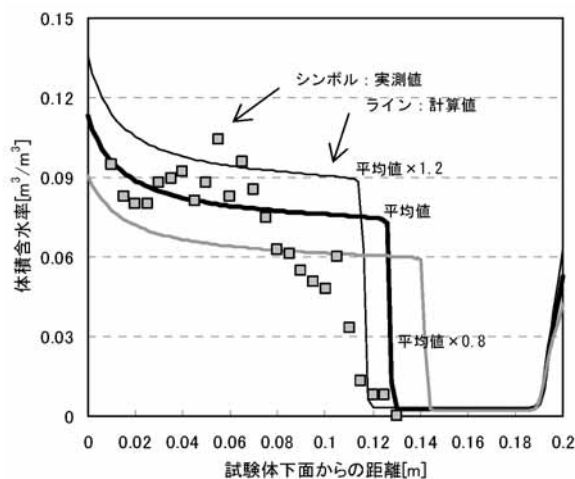


(1) 水分伝導率推定値の計算結果
平衡含水率の近似値に図-7の(a)を用いた場合

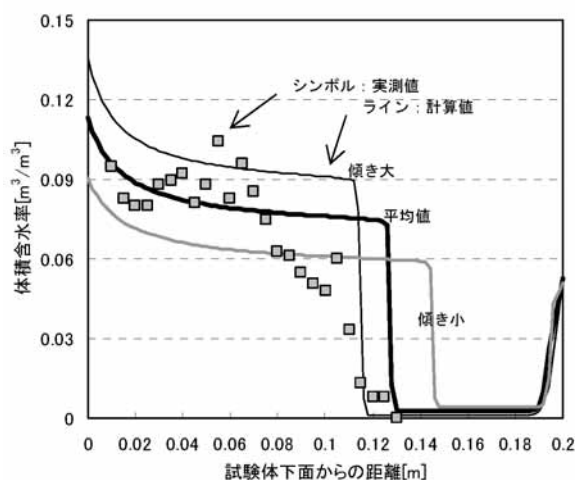


(2) 水分伝導率推定値の計算結果
平衡含水率の近似値に図-7の(b)を用いた場合

図-8 平衡含水率の影響1



(1) 吸水実験における含水率分布の計算値と実測値との比較（実験開始116時間後）
平衡含水率に近似値の図-7の(a)を用いた場合



(2) 吸水実験における含水率分布の計算値と実測値との比較（実験開始116時間後）
平衡含水率に近似値の図-7の(b)を用いた場合

図-9 平衡含水率の影響 2

4. まとめ

コンクリートの水分化学ポテンシャル勾配に関する水分伝導率の決定に関係する諸数値（湿気伝導率測定でのピーカー内空気の湿気抵抗、コンクリートの透水係数および平衡含水率）について、それらが結果に及ぼす影響の程度を明らかにした。また、湿気抵抗に文献値を、透水係数および平衡含水率に実測値の平均を用いることに大きな問題がないことを確認した。

[記号]

C_1 、 C_2 : パラメータ、 d : コンクリート試験片の厚さ [m]、 g : 重力加速度 [m/s^2]、 J : 水分流 [$\text{kg/m}^2\text{s}$]、 K : 透水係数 [m/s]、 R' : ピーカー内空気の湿気抵抗 [$\text{m}^2\text{Pa/kg}$]、 Rh : 相対湿度 [-]、 R_v : 水蒸気のガス常数 [Pam^3/kgK]、 p_v : 水蒸気圧 [Pa]、 p_{vs} : 飽和水蒸気圧 [Pa]、 T : 温度 [K]、 α' : 湿気伝達率 [$\text{kg/m}^2\text{Pa}$]、 λ' : (気相水分の) 湿気伝導率 [kg/msPa]、 λ'_{μ} : μ 勾配に関する水分伝導率 [kg/ms(J/kg)]、 $\lambda'_{\mu g}$: μ 勾配に関する気相水分伝導率 [kg/ms(J/kg)]、 $\lambda'_{\mu l}$: μ 勾配に関する液相水分伝導率 [kg/ms(J/kg)]、 μ : 水分化学ポテンシャル [J/kg]、 ρ_w : 水の比重量 [kg/m^3]、 ψ : 体積含水率 [m^3/m^3]、 Φ : 空隙率 [-]、 $\Delta\mu$: 水分化学ポテンシャル差 [J/kg]
添え字) *out* : ピーカーの外、*in* : 飽和塩水溶液表面、
1 : 試験片の上面、2 : 試験片の下面

[参考文献]

- 1) 恩村定幸、銚井修一、松下敬幸、小椋大輔、小南和也、安井義貴：「強度の異なるコンクリートの熱・湿気物性に関する研究 その1 平衡含水率の測定」、日本建築学会大会学術講演梗概集D-2環境工学Ⅱ、pp.403～404、2004
- 2) 安井義貴、銚井修一、松下敬幸、恩村定幸、小椋大輔、小南和也：「強度の異なるコンクリートの熱・湿気物性に関する研究 その2 熱伝導率、湿気伝導率の測定」、日本建築学会大会学術講演梗概集D-2環境工学Ⅱ、pp.405～406、2004
- 3) 恩村定幸：強度の異なるコンクリートの熱・湿気物性、浅沼組技術研究所報、No.16、pp.29～36、2004
- 4) 安井義貴、銚井修一、松下敬幸、恩村定幸、小椋大輔、小南和也：「異なる強度のコンクリートの熱・湿気物性に関する研究 その3 透水係数の測定、気液分離方法の提案」、日本建築学会大会学術講演梗概集D-2環境工学Ⅱ、pp.381～382、2005
- 5) 恩村定幸、銚井修一、松下敬幸、小椋大輔、小南和也、安井義貴：「強度の異なるコンクリートの熱・湿気物性に関する研究 その4 水分化学ポテンシャル勾配に関する液相水分伝導率の推定」、日本建築学会大会学術講演梗概集D-2環境工学Ⅱ、pp.337～338、2006
- 6) 恩村定幸：強度の異なるコンクリートの熱・湿気物性 その2 水分伝導率の推定、浅沼組技術研究所報、No.18、pp.31～38、2006

- 7) 小椋大輔、鉾井修一、松下敬幸、恩村定幸、小南和也、安井義貴：「異なる強度のコンクリートにおける熱・湿気物性に関する研究 その5 ガンマ線含水率測定装置を用いた吸水実験による水分物性値の同定」、日本建築学会大会学術講演梗概集D-2環境工学Ⅱ、pp.339～340、2006
- 8) 渡辺要編：「建築計画原論Ⅲ」、丸善、1978