

鉄筋コンクリート壁の異なる位置における熱・湿気物性

Relationship between Heat and Moisture Properties and Place of Reinforced Concrete Wall

恩村 定幸* 立松 和彦*
山崎 順二*

要 旨

壁体内の空隙の構造や量は、コンクリートの強度の違いによって異なる。これらの差異は、結露解析等に必要となる熱・湿気の移動に関する物性値（平衡含水率、熱伝導率、湿気伝導率、透水係数）に影響を及ぼす。また、壁体内の空隙は、コンクリート打設時のブリーディングや圧密などの影響によって、壁体における位置の違いでも差異が生じると考えられる。そこで、実大壁体の上部と下部、表層と中央といった異なる位置における熱・湿気物性の測定を行った。その結果、湿気の伝わりやすさ（湿気伝導率）や水分の吸放出量（平衡含水率）は、壁体の下部よりも上部の方が大きいことがわかった。壁体の中央と表層については顕著な傾向が見られなかったが、高含水域での湿気の伝わりやすさは、表層よりも中央の方が大きいことがわかった。

キーワード：コンクリート／熱水分同時移動方程式／平衡含水率／熱伝導率／湿気伝導率／透水係数

1. はじめに

コンクリート壁体内部の熱水分移動の様相（温度や含水率の経時変動や分布性状）を明らかにすることは、鉄筋コンクリート建造物の防露設計を的確に行う上で重要である。

通常の建築壁体内部における熱水分移動は、凍結融解現象がない場合、表-1の(1)、(2)式に示す熱水分同時移動方程式を用いて解析することができる¹⁾。この基礎式で用いられる水分移動に関する係数（水分化学ポテンシャルおよび温度勾配に関する水分伝導率： λ'_{μ} 、 λ'_T 、 $\lambda'_{\mu g}$ 、 λ'_{Tg} ）を測定することが困難なコンクリートの場合、これらの移動係数は既に測定されている湿気伝導率（ λ' ）や透水係数（ K ）などから表-1の(3)～(6)式を用いて推定できる²⁾。しかし、近年、採用が増えつつある強度の高いコンクリートでは、これらの物性値について不明な点が多い。既報^{3)、4)、5)}では、一般的に用いられている異なる強度のコンクリート（Fc27、Fc33、Fc40、Fc60：ここのFcは呼称）について、平衡含水率、熱伝導率および湿気伝導率の測定を行い、これらの物性値を把握するとともに、強度の違いに対応する空隙の構造や量の差異が、物性値に影響を及ぼすことを確認した。

しかし、壁体内の空隙の構造や量の差異は、強度の違いだけではなく、コンクリート打設時のブリーディングや圧密などの影響によって、壁体における位置の違いでも生じると考えられる。そこで、本研究では実大壁体の上部と下部、表層と中央といった異なる位置における熱・

湿気物性の測定を行った。本報では既に測定が終わっている平衡含水率と湿気伝導率の測定結果について述べる。

2. 試験体の作成

2.1 実大壁体

図-1および写真-1に実大壁体の形状を示す。壁体は東西方向に面しており、大きさは幅5.25m、高さ2.2m、厚さ0.18mで、中央に0.63m角の柱を含んでいる。平成16年5月に配筋（壁：D10@200W、柱：12-D19、D10@100）を行い、翌日より型枠を建込んだ。その後、コン

表-1 基礎式

【水分収支式】

$$\rho_w \left(\frac{\partial \psi}{\partial \mu} \right) \frac{\partial \mu}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda'_{\mu} \frac{\partial \mu}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda'_T \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (1)$$

【熱収支式】

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(r\lambda'_{\mu g} \frac{\partial \mu}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left((\lambda + r\lambda'_{Tg}) \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (2)$$

$$\lambda'_{Tg} = \lambda' e^{\frac{\mu}{R_v T}} \left(\frac{\partial P_{vs}}{\partial T} - P_{vs} \frac{\mu}{R_v T^2} \right) \quad (3)$$

$$\lambda'_{\mu g} = \lambda'_{Tg} \left[I / \left(\frac{R_v T}{P_{vs}} \frac{\partial P_{vs}}{\partial T} - \frac{\mu}{T} \right) \right] \quad (4)$$

$$\lambda'_{\mu} = \lambda'_{\mu g} + \lambda'_{\mu t}, \quad \lambda'_{\mu t} = K\rho_w / g \quad (5)$$

$$\lambda'_T = \lambda'_{Tg} \quad (\lambda'_{Tt} = 0) \quad (6)$$

*建築研究グループ

クリート（Fc27）を打設し、翌日に脱型した。実験で用いたコンクリートの材料および調合は、前年度（既報）で行ったもの（Fc27）とほぼ同じである。コンクリートの材料および調合の概要を表－２と表－３に示す。また、コンクリート打設時に行ったフレッシュ試験の結果と材齢４週圧縮強度の試験結果を表－４に示す。これらの品質試験結果においても、既報の試験結果とで大きな違いはなかった。

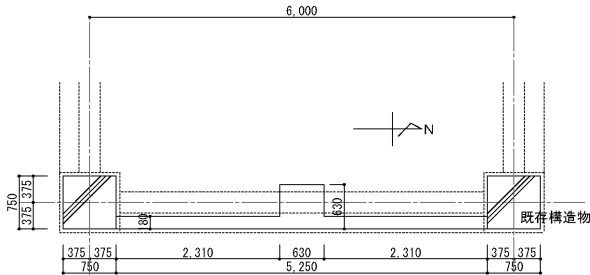
表－２ コンクリートの使用材料

	本 報	既 報
セメント	普通ポルトランドセメント ・密度3160kg/m ³	普通ポルトランドセメント ・密度3160kg/m ³
細 骨 材	山砂 ・表乾密度2560kg/m ³	海砂と山砂（7：3） ・表乾密度2570kg/m ³
粗 骨 材	碎石 ・表乾密度2680kg/m ³	碎石 ・表乾密度2670kg/m ³
混 和 剤	AE減水剤	AE減水剤、AE助剤

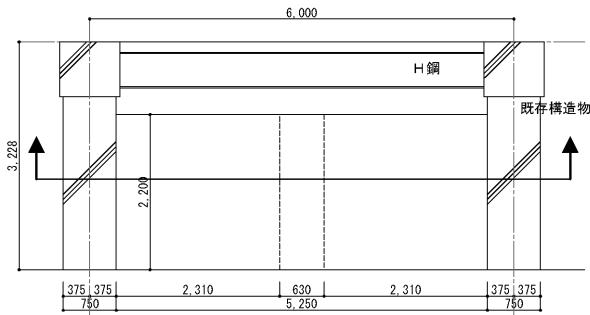
※既報のFc60には低熱ポルトランドセメント、密度3240kg/m³を使用

表－３ コンクリートの調合概要

	本 報	既 報
W/C（％）	54.0	54.0
細骨材率（％）	47.6	49.1
単 位 量 (kg/m ³)	セメント	333
	水	180
	細 骨 材	817
	粗 骨 材	941
	混 和 剤	2.9
		2.3

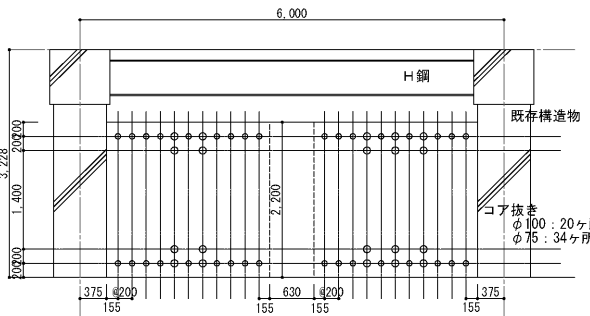


【断面図】



【東立面図】

図－１ 実大壁体の形状



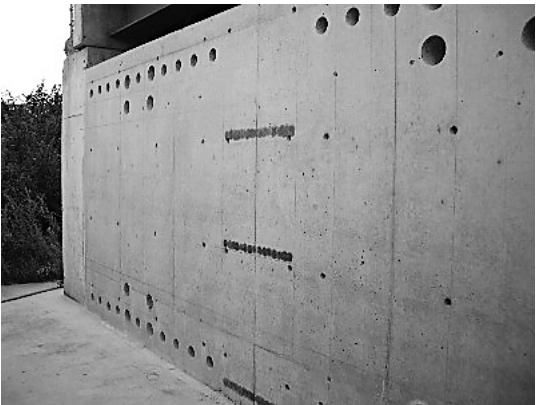
図－２ コア抜き位置（東側）

表－４ コンクリートの品質試験結果

	本 報	既 報
スランプ（cm）	19.0	18.3
スランプフロー（cm）	28.0×25.5	30.5×30.0
空気量（％）	4.7	5.5
温度（℃）	25.0	21.0
4週圧縮強度（N/mm ² ）	35.7	38.6
〔ヤング係数（N/mm ² ）〕	〔3.03×10 ⁴ 〕	〔2.91×10 ⁴ 〕



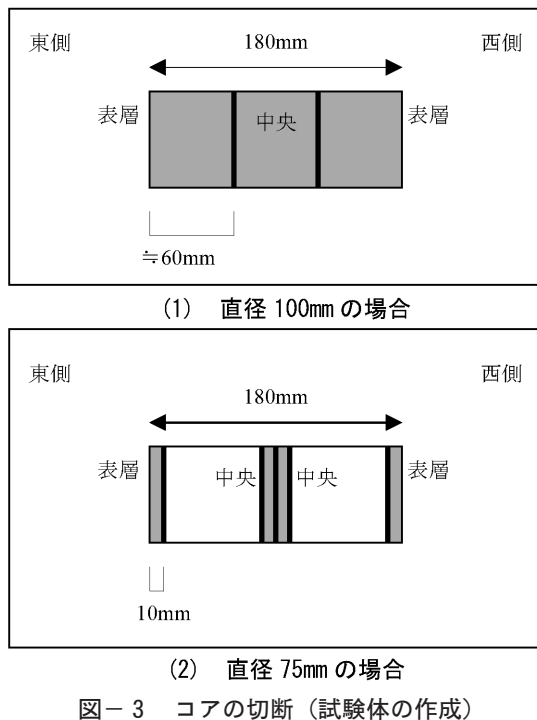
写真－１ 実大壁体（東側）



写真－２ コア抜き状況（東側）

2.2 コア抜きと切断

コンクリート打設後 8 週間程度気中で放置した後、所定の位置でコアを抜き（写真－ 2）、翌日にそれらを切断して測定に用いる試験体を作成した。図－ 2 にコアを抜いた位置を示す。壁体の上部、下部とも 10 箇所の位置で直径 100mm のコアを抜き、図－ 3 (1) に示すようにそれらを 3 等分した（厚さ約 60mm）。また、壁体の上部、下部とも 17 箇所の位置で直径 75mm のコアを抜き、図－ 3 (2) に示すようにそれらから厚さ 10mm の試験体を 4 つずつ切り出した。表－ 5 に試験体の概要を示す。



表－ 5 試験体の概要

大 き さ	場 所			個数
直径 75mm 厚さ 10mm (平衡含水率、湿気伝導率の測定に使用)	上部	表層	東側	34
			西側	
		中央	東側	34
			西側	
	下部	表層	東側	34
			西側	
		中央	東側	34
			西側	
直径 100mm 厚さ 約 60mm (熱伝導率、透水係数の測定に使用)	上部	表層	東側	20
			西側	
		中央	—	10
			—	
	下部	表層	東側	20
			西側	
		中央	—	10
			—	

試験体はすべて水中に浸漬した。平衡含水率の測定に用いる試験体については、10日後に飽水時重量と水中における見かけの重量を測定し、その翌日に絶乾重量（105℃、24h乾燥）を測定した。なお、既報の実験ではコンクリートの打設から試験体作成までの期間は水中で標準養生を行ったが、今回は現場施工に合わせて特別な養生は行わなかった。

3. 測定方法

3.1 平衡含水率

既報と同様に、簡易デシケータ法⁶⁾によって平衡含水率の測定を行った。恒温・恒湿室に所定の飽和塩水溶液（ $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ：33%RH、 NaCl ：75%RH、 KCl ：85%RH、 KNO_3 ：93%RHの4種類）を入れたデシケータを設置し、その中に吸湿過程の場合は絶乾状態の試験体を、放湿過程の場合は飽水状態の試験体を温・湿度計とともに3個ずつ入れて密閉した後、試験体が湿気平衡に達するまで放置した（図－ 4）。試験体には、前述の直径 75mm、厚さ 10mm の試験体を各パラメータに対して 24 個ずつ、計 96 個用いた。その内訳は、4 パラメータ（上部表層、上部中央、下部表層、下部中央） $\times$ 4 塩類 $\times$ 2（吸・放湿） $\times$ 3 = 96 である。湿気平衡は、代表試験体の重量変化の様相で判断した。湿気平衡後に各試験片の重量を測定し、それらと試験前に測定しておいた飽水時重量や水中における見かけの重量および絶乾重量から平衡含水率を算定した。

3.2 湿気伝導率

既報と同様に、カップ法⁶⁾に準じた方法によって湿気伝導率の測定を日本建築総合試験所にて行った。所定の飽和塩水溶液（ LiCl ：11%RH、 NaCl ：75%RH、 H_2O ：100%RHの3種類）が入ったガラスカップをパラフィンで側面を断湿した試験体で蓋をし、恒温・恒湿槽内（20℃、55%RH）に設置して、これらの重量変化量を定常になるまで測定した（図－ 5）。試験体には、前述の直径 75mm、厚さ 10mm の試験体を各パラメータに対して 9 個ずつ、計 36 個用いた。その内訳は、4 パラメータ（上部表層、上部中央、下部表層、下部中央） $\times$ 3 塩類 $\times$ 3 = 36 である。定常の判断は、経過時間と重量変化量の相関が相関係数で 0.99 以上とした。測定した重量変化量（＝透湿量）と試験片の面積および厚さ、水蒸気圧差から湿気伝導率を算定した。

4. 測定結果と考察

4.1 平衡含水率

代表試験体の重量変化（絶乾重量を0とした場合の重量の経時変化）の測定結果を図-6に示す。測定開始から140日を経過したあたりで恒温・恒湿室の空調機器の故障によって重量が大きく変化しているが、測定開始から175日を経過した以降の重量変化は比較的安定している。そして、測定開始から200日に達した時点では、試験体の1週間における重量変化は最大でも20mgよりも小さく、試験体の重量に対しても0.02%程度の変化量である。厳密にはこの状態が湿気平衡状態とは言えないが、実験をこれ以上継続しても大きな変化を望めないことや試験体の損傷等を考慮して、測定開始から200日にて実験を切り上げた。

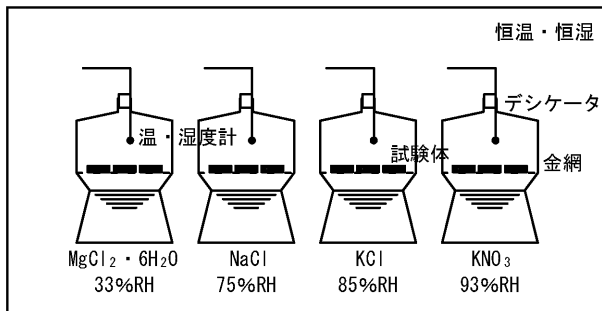


図-4 簡易デシケータ法の概要

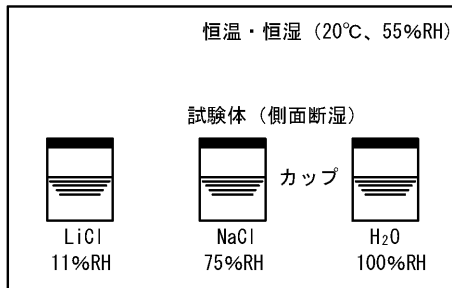


図-5 湿気伝導率測定のための装置の概要

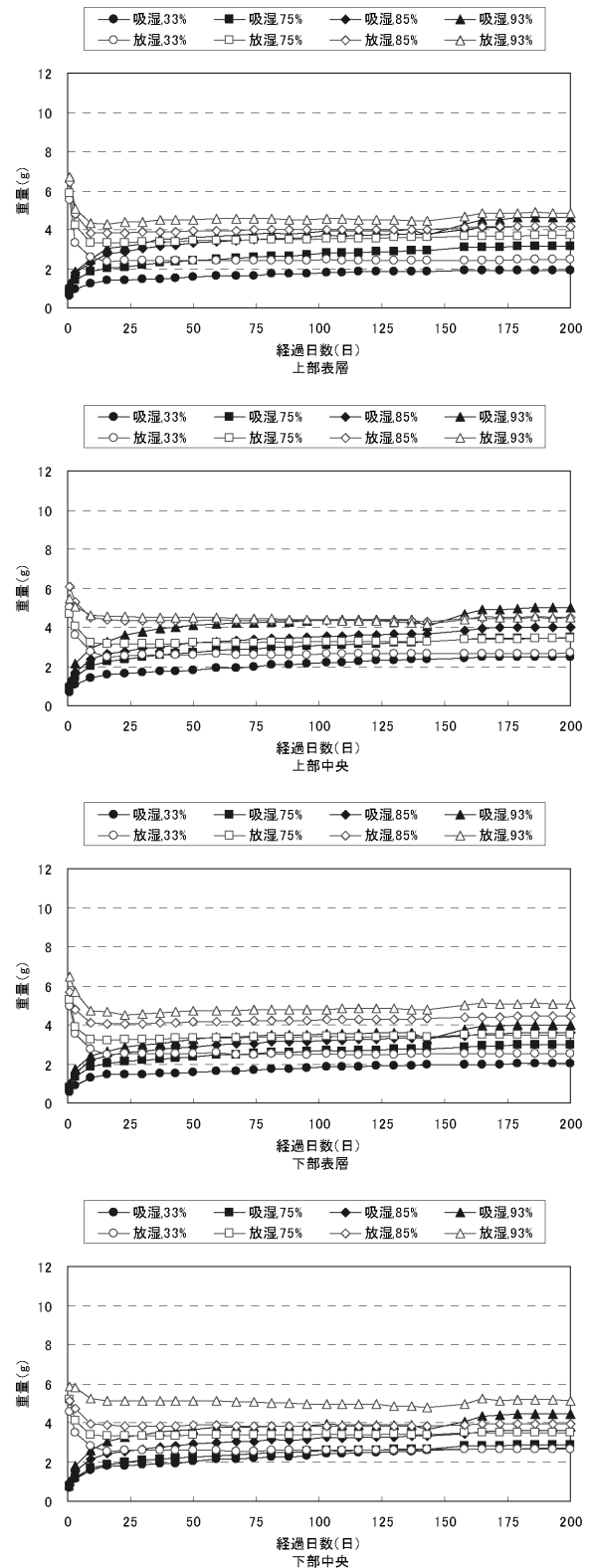


図-6 平衡含水率の測定における代表試験体の重量変化量

重量に関する測定結果を基に作成した飽水時における体積含水率と絶乾密度の分布図をそれぞれ図-7と図-8に示す。色が濃いほど数値は高い。飽水時における体積含水率の分布から壁体の中央よりも表層の方が、壁体の下部よりも上部の方が、壁の中央よりも柱との取り合いの方が、空隙が多いことが推察される。

また、絶乾密度の分布から壁体の表層よりも中央の方が、上部よりも下部の方が、絶乾密度が大きく、これは粗骨材の分布による影響と考えられる。コンクリート内の空隙量や骨材の上下方向の分布は、コンクリートの構成材料の比重の違いによるブリーディングやコンクリート自身の圧密によって形成されると言われている。比重の小さい水が上方に浮き出し、比重の大きい骨材が下方に偏る。その結果、壁体上部ほど多水状況の中でセメントが硬化するために空隙が多くなり、壁体上部の密度が小さくなると思われる。

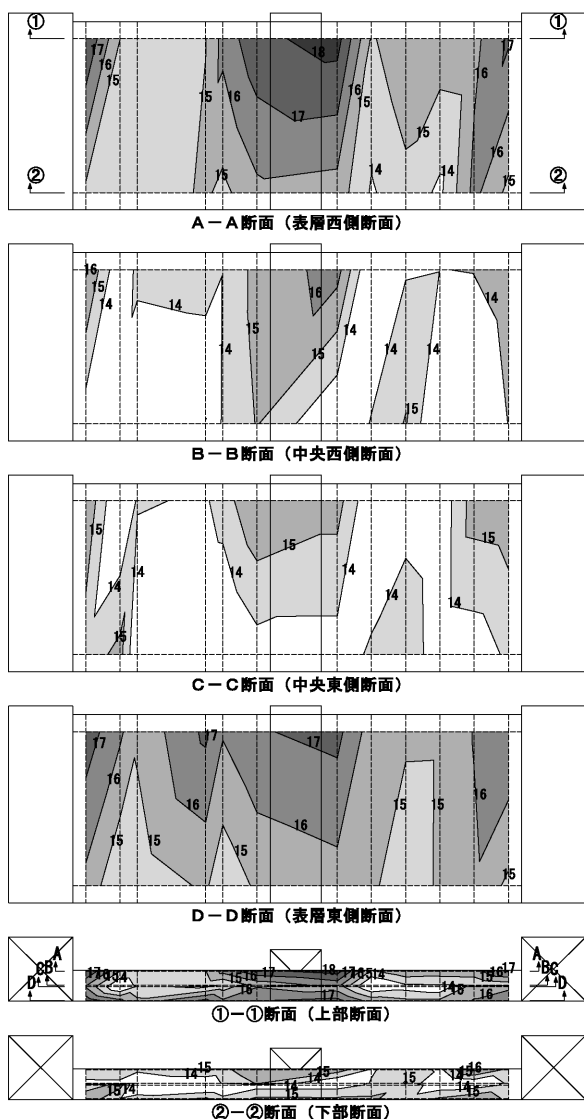


図-7 飽水時における体積含水率(vol%)の分布図

厚さ方向については、透水性の合板型枠からの滲水や蒸発による水分の移動によって壁体表面が多水状況となり、そこでセメントが硬化するために内部よりも空隙が多くなるものと思われる。

また、コンクリートの打設時は、壁面に豆板（ジャンカ）ができないようにバイブレータ等を用いてセメントペーストが型枠表面に充填されるため、骨材が中央に若干ながら偏ったものと思われる。

平衡含水率の測定結果を表-6と図-9に示す。本研究の測定結果においても既報の測定結果と同様に、吸湿過程と放湿過程との間にヒステリシス（履歴）が確認された。図示していないが、ほぼ同じコンクリートであるのに対し、平衡含水率は既報よりも本研究の測定結果の方が全般的に大きい。また、吸湿過程と放湿過程における各々の平衡含水率の差は、既報の結果と比べて本研究の結果の方が小さい。これらの差異は、実際の強度や養

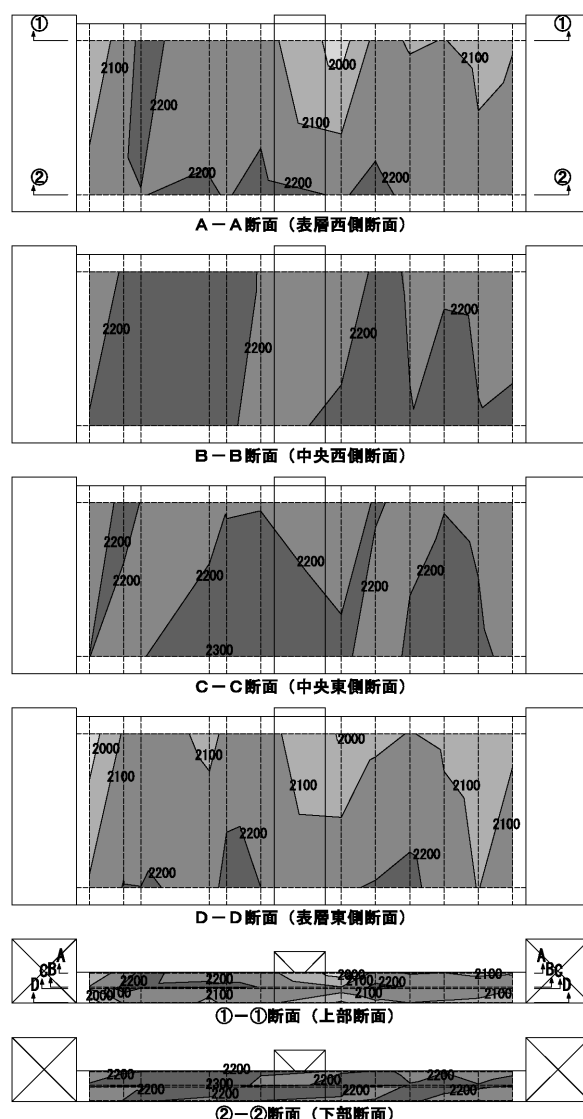


図-8 絶乾密度 (kg/m³) の分布図

生方法および試験体の作成方法の違いが影響したものと思われる。

壁体の位置における影響を見ると、吸湿過程と放湿過程における各々の平衡含水率の差は、壁体の上部よりも下部の方が若干大きく、平衡含水率の大きさは壁体の上部よりも下部の方が小さい傾向が見られた。つまり、壁体上部の方が吸放湿し易く、これは壁体上部の方が、空隙が多いと推察したことに合致する。

壁体の表層と中央とは、吸湿過程、放湿過程とも低含水域では壁体の中央の方が、高含水域では壁体の表層の方が平衡含水率は大きい傾向にあるが、その差は小さい。すなわち、上下方向での平衡含水率の差の方が厚さ方向での平衡含水率の差よりも大きく、これはブリーディングや圧密の影響が大きいと考えられる。

4.2 湿気伝導率

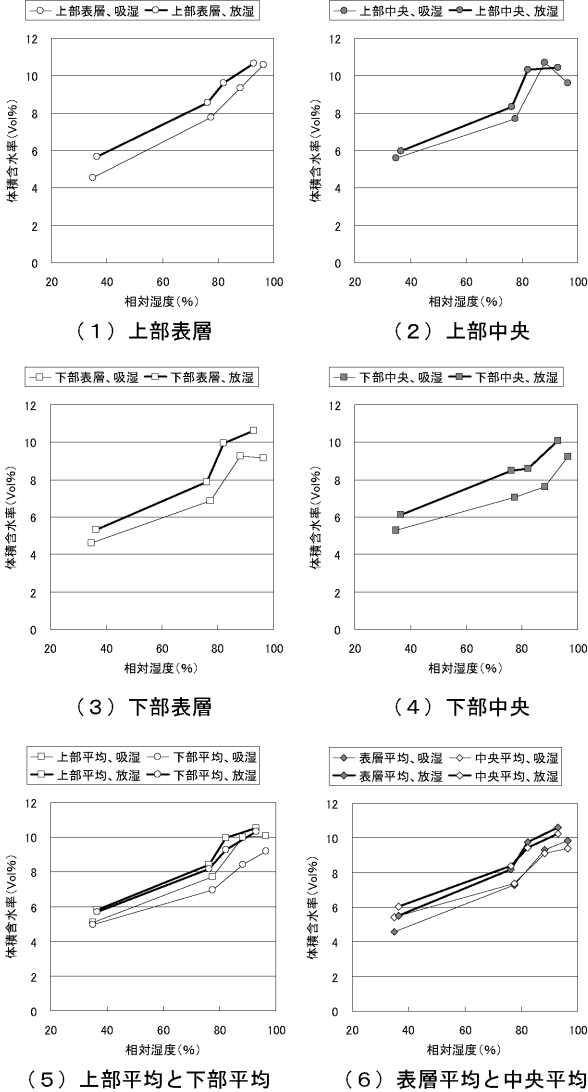
湿気伝導率の測定結果を表－7と図－10に示す。図示していないが、平衡含水率と同様に、湿気伝導率も既報よりも本研究の測定の方が全般的に大きい結果となった。

壁体の位置における影響を見ると、壁体の上部よりも下部の方が、湿気伝導率が小さい。すなわち、湿気は壁体の下部の方が流れにくく、これは平衡含水率の結果と同様に、ブリーディングや圧密に起因する空隙の量で説明できる。一方、厚さ方向における湿気伝導率については、低含水域では壁体の表層の方が、高含水域では壁体の中央の方が大きく、その差は後者の方が顕著であった。これは空隙の量だけではなく、大きさ等の構造の違いが影響していると考えられる。

表－6 平衡含水率の測定結果（平均、単位Vol%）

	吸 湿 過 程			
相対湿度	34.9%	77.5%	88.2%	96.5%
上部表層	4.55	7.76	9.35	10.59
上部中央	5.59	7.71	10.67	9.61
下部表層	4.61	6.88	9.26	9.14
下部中央	5.30	7.07	7.60	9.23
上部平均	5.07	7.73	10.01	10.10
下部平均	4.96	6.97	8.43	9.19
表層平均	4.58	7.32	9.31	9.87
中央平均	5.44	7.39	9.13	9.42

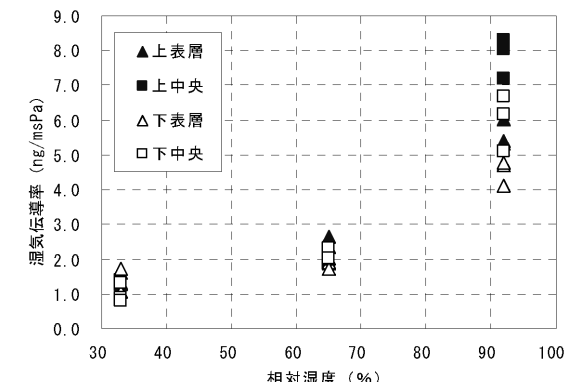
	放 湿 過 程			
相対湿度	36.5%	76.3%	82.2%	92.9%
上部表層	5.68	8.54	9.62	10.64
上部中央	5.95	8.33	10.30	10.42
下部表層	5.32	7.87	9.96	10.60
下部中央	6.10	8.47	8.58	10.10
上部平均	5.81	8.44	9.96	10.53
下部平均	5.71	8.17	9.27	10.35
表層平均	5.50	8.20	9.79	10.62
中央平均	6.02	8.40	9.44	10.26



図－9 平衡含水率関係

表－7 湿気伝導率の測定結果（平均、単位ng/msPa）

相対湿度	33%	65%	92%
上部表層	1.40	2.29	5.58
上部中央	1.33	2.07	7.84
下部表層	1.39	1.89	4.53
下部中央	1.01	2.19	6.00



図－10 湿気伝導率の測定結果

5. 異なる強度のコンクリートの透水係数

測定途中のため、既報で報告できなかった異なる強度のコンクリートにおける透水係数の測定結果を示す。

5.1 試験体

直径100mm、長さ300mmの円柱形をしたコンクリート体を各強度（Fc27、Fc33、Fc40、Fc60）とも1体ずつ作成し、各々から厚さ10mmの試験体を3個ずつ切り出した。

5.2 測定方法

測定は岸本等の測定方法⁷⁾を参考した。図-11と写真-3に測定装置を示す。水頭差によって水分が移動するようにメスピペットが設置されている。まず、側面をアルルダイトとアルミ箔を用いて断湿した試験体をデシケータ内の蒸留水に沈め、真空ポンプを用いて脱気する。その後、恒温槽（20℃）内の装置に試験体を設置し、水分移動量の測定を定常になるまで行った。定常の判断は、経過時間と水分移動量の相関が相関係数で0.99以上とした。透水係数は下記に示す式(7)より求められる。蒸発の影響は、微小な穴を開けたビニールで装置上部を覆うことで抑えた。この測定では試験体上部の水位が水分の移動と水面での蒸発により変動する。測定終了時の水位は最大で3mmほど低くなっていたが、この水頭差の変化の影響は、透水係数に換算すると1%に満たないので、水頭差は定数として扱った。なお、測定は神戸大学にて行われた。

$$K = \frac{Q}{A} \cdot \frac{L}{\Delta h} \quad (7)$$

5.3 測定結果と考察

透水係数の測定結果を表-8に示す。図-12は水セメント比と透水係数との関係を示したものである。Fc60を除き、水セメント比が大きくなるほど（強度が小さくなるほど）透水係数は大きい。つまり、強度が小さいほど壁体内の液水が流れやすいと考えられる。Fc60については、既報で述べたように、吸水率の異なるセメントを使用しているため、他の強度のコンクリートで見られる傾向に適合しないものと思われる。

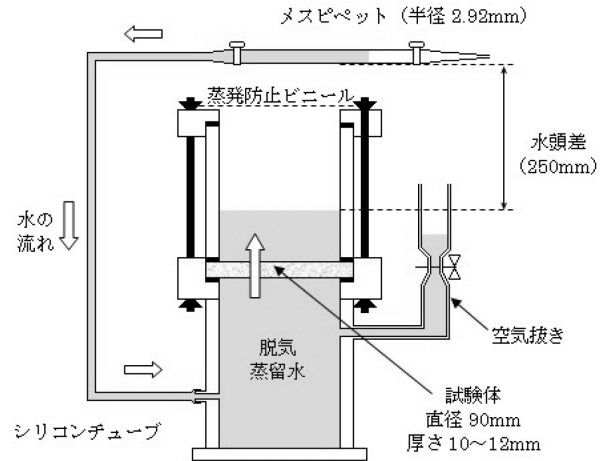


図-11 透水係数の測定装置



写真-3 透水係数の測定装置

表-8 透水係数の測定結果

強度 [()] 内は水セメント比 (%)]	透水係数 (m/s)
Fc27 (54)	3.23×10^{-11}
Fc33 (47)	2.64×10^{-11}
Fc40 (40)	1.87×10^{-11}
Fc60 (32)	2.16×10^{-11}

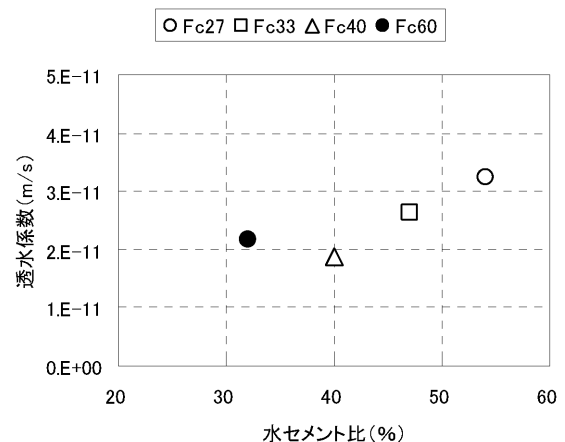


図-12 透水係数の測定結果
（水セメント比との関係）

6. まとめ

コンクリートの熱水分移動に関する各種物性値を把握すると同時に、壁体の位置による影響を知るために、実大壁体の上部と下部、表層と中央といった異なる位置における平衡含水率と湿気伝導率の測定を行った。その結果を以下に示す。

(1) 平衡含水率

- ・壁体のいずれの位置においても吸湿過程と放湿過程で平衡含水率が異なりヒステリシスが確認された。
- ・平衡含水率は、壁体の下部よりも上部の方が大きい傾向が得られた。
- ・上記の傾向は、ブリーディングや圧密に起因する空隙の量が影響するものと考えられる。
- ・壁体の中央と表層では顕著な傾向が見られなかった。

(2) 湿気伝導率

- ・湿気伝導率は、壁体の下部よりも上部の方が大きい傾向が得られた。
- ・壁体の中央と表層では、低含水域では顕著な傾向が見られなかったが、高含水域では壁体の表層よりも中央の方が大きい傾向が得られた。
- ・上記の傾向は、空隙の量だけではなく、大きさ等の構造の違いも影響していると考えられる。

また、異なる強度のコンクリートにおける透水係数を測定した結果、既報の湿気伝導率と同様に、強度が小さいほど透水係数が大きくなる傾向が得られた。

[記号]

μ : 水分化学ポテンシャル (J/kg)、 T : 温度 (K)、 ψ : 体積含水率 (m^3/m^3)、 λ : 熱伝導率 (W/mK)、 λ' : 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))、 $\lambda'_{\mu t}$: μ 勾配に関する液相水分伝導率 (kg/ms(J/kg))、 λ'_{T_r} : 温度勾配に関する水分伝導率 (kg/msK)、 λ'_{T_g} : 温度勾配に関する気相水分伝導率 (kg/msK)、 λ'_{T_l} : 温度勾配に関する液相水分伝導率 (kg/msK)、 K : 透水係数 (m/s)、 c : 比熱 (J/kgK)、 ρ : 比重量 (kg/m^3)、 ρ_w : 水の比重量 (kg/m^3)、 r : 蒸発潜熱 (J/kg)、 R_v : 水蒸気のガス常数 ($\text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{kgK}$)、 P_{vs} : 飽和水蒸気圧 (Pa)、 g : 重力加速度 (m/s^2)、 q_v : 水蒸気流 (kg/ms)、 Q : 水分移動量 (m^3/s)、 A : 試験体の断面積 (m^2)、 L : 試験体の厚さ (m)、 Δh : 水頭差 (m)、 t : 時刻 (s)、 x : 位置 (m)

[謝辞]

本研究は京都大学、神戸大学および日本建築総合試験所との共同研究であり、関係者各位に感謝いたします。また、本研究を行うにあたり、京都大学鉾井修一教授と神戸大学松下敬幸教授にご指導いただきました。ここに感謝の意を表します。

[参考文献]

- 1) 松本、他：新建築学体系10環境物理、彰国社、1984
- 2) 小椋：地下構造物の熱・湿気性状に関する研究、2000.8 (博士論文)
- 3) 恩村、他：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) 恩村、他：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
- 5) 安井、他：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
- 6) 黒木、他：建築材料の湿気物性JIS規格測定法、日本建築学会環境工学委員会熱環境小委員会「湿気研究の新たな進展」、pp.25~32、2001
- 7) 岸本、他：コンクリート壁体の中性化に及ぼす水分の影響、日本建築学会近畿支部研究報告集 第43号 環境系、pp.241~244、2003