

強度の異なるコンクリートの熱・湿気物性

Relationship between Heat and Moisture Properties of Concrete and Strength

恩村 定幸* 立松 和彦* 山崎 順二*

要 旨

近年、建物の高層化や材料技術の進歩にともない、高強度コンクリートの採用が増えつつある。ところが、これらのコンクリート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に不明な点が多く、計算に通常用いられている値にも問題がある。そこで、現在、一般的に用いられている数種類の強度のコンクリートについて、熱・湿気物性（平衡含水率、熱伝導率、湿気伝導率）の測定を行い、既往の文献値と比較するとともに、強度の違いが各物性値に与える影響について検討した。その結果、平衡含水率と湿気伝導率は強度の違いによる影響が大きく、熱伝導率は強度の違いによる影響が小さかった。さらに、コンクリートは熱伝導率に関して大きなばらつきを持つ材料であることが確認され、水分移動については低湿度域でも液水移動の影響があることが推察された。

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。また、壁体内部と表面との含水率の差が一因で発生する構造体の乾燥クラックや壁体表層の含水率が影響する表面仕上げ材の剥離やふくれ、壁体が放出する水分量やアンモニア濃度の抑制などを検討する上でも重要な情報といえる。

通常の建築壁体内部における熱水分移動は、凍結融解現象を考慮しない場合、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⁾。

以上から、材料内の水分移動は湿気伝導率が大きく影響していることが判明しているが、これまで、コンクリートの湿気伝導率には $2.9 \times 10^{-12} \text{kg/msPa}$ という値が一般的に用いられてきた³⁾。しかし、この値は水、セメント、骨材の割合が1：2：4の調合で、W/C=70%のコンクリートについて、45年前に測定されたものである。したがって、次に示すような問題がある。

- ・測定された時期が古い。
- ・W/C=70%のコンクリートは構造体に用いられること

がない（JASS5-2003の最大値が65%）。

さらに、異なった値を記した文献などもあり⁴⁾、どの値を用いてよいのか判断し難い状況にある。このことは湿気伝導率だけに限らず、熱伝導率や平衡含水率などのその他の物性値についても同じことがいえる。

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】

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

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

$$\lambda'_{\mu g} = \lambda'_{Tg} \left(1 / \left(\frac{R_v T}{P_{vs}} \frac{\partial P_{vs}}{\partial T} - \frac{\mu}{T} \right) \right) \quad (4)$$

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

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

*建築研究グループ

表－２は、用途別のコンクリートの強度とW/Cの関係を示したものである。最近では、このように様々なコンクリートが用いられており、前述の物性値に関する問題や現在の材料技術が進歩している状況を考えた場合、現状に適合したコンクリートについて、測定が可能な物性値を正確に測定し直す必要がある。

以上のような背景を踏まえ、現在、一般的に用いられている強度の異なるコンクリート（Fc27、Fc33、Fc40、Fc60：以降Fcは呼称として用いる）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った。本報では、これらの測定結果について報告する。

表－２ 一般的に使用されるコンクリートの現状

	設計基準強度Fc (N/mm ²)	W/C (%)
通常のコンクリート (低・中層建物用)	21, 24, 27	50～60
中強度コンクリート プレキャストコンクリート (中・高層建物用)	30～36	45～50
高強度コンクリート (高層建物・超高層建物用)	36～60 60～100	30～45 20～30
超高強度コンクリート (超高層建物用)	100～200	15～20

表－３ 用いたコンクリートの使用材料

セメント	普通ポルトランドセメント（密度3160kg/m ³ ）、 Fc60のみ低熱ポルトランドセメント （密度3240kg/m ³ ）
細骨材	海砂と砕砂（混合率7:3、合成密度2570kg/m ³ ）
粗骨材	砕石（表乾密度2670kg/m ³ ）
混和剤	高性能AE減水剤、AE助剤

表－４ 用いたコンクリートの調合概要

	W/C (%)	細骨材率 (%)
Fc27	54	49.1
Fc33	47	49.8
Fc40	40	49.4
Fc60	32	49.2

表－５ 用いたコンクリートの品質試験結果

	Fc27	Fc33	Fc40	Fc60
スランブ (cm)	18.3	20.0	23.5	—
スランブフロー (cm)	30.6×29.8	34.7×31.6	43.2×41.6	47.3×46.8
空気量 (%)	5.5	5.0	4.9	3.5
温度 (°C)	21	21	21	22
4週圧縮強度 (N/mm ²)	38.6	42.0	47.8	64.3
13週圧縮強度 (N/mm ²)	—	—	—	79.6
ヤング係数 (N/mm ²)	2.91×10 ⁴	2.95×10 ⁴	3.04×10 ⁴	3.90×10 ⁴

2. 試験体および試験片

測定するコンクリートの使用材料を表－３に、調合概要を表－４に、品質試験結果（フレッシュ試験および圧縮強度試験）を表－５に示す。

直径75mm、長さ300mmの円柱形をしたコンクリート試験体を各強度とも３体ずつ（以下「試験体A」と称す）、直径100mm、長さ300mmの円柱形をしたコンクリート試験体を各強度とも１体ずつ（以下「試験体B」と称す）、290×290×60mmの大きさのコンクリート試験体（以下「試験体C」と称す）を各強度とも15体ずつ作製した。

12体の試験体Aのうち８体を用いて平衡含水率測定用の試験片を96個作製した。その内訳は、強度〔４種類〕×飽和塩水溶液〔４種類〕×吸放湿〔２条件〕×３個ずつの計96個である。１体の試験体から厚さ10mmの試験片を８個、厚さ15mmの試験片を４個切り出した。

試験体Aの残りの４体を用いて湿気伝導率測定用の試験片を48個作製した。その内訳は、強度〔４種類〕×含水状況〔４条件〕×３個ずつの計48個である。１体の試験体から厚さ10mmの試験片を12個切り出した。

試験体Bは透水係数測定用の試験片を作製するものであるが、現在、計測中のため、ここでの説明を割愛する。試験体Cは熱伝導率の測定に用いた。

3. 測定方法

3.1 平衡含水率

簡易デシケータ法⁵⁾によって平衡含水率の測定を当社技術研究所と神戸大学にて行った。恒温・恒湿室（または恒温・恒湿槽）に所定の飽和塩水溶液（MgCl₂・6H₂O：33％RH、NaCl：75％RH、KCl：85％RH、KNO₃：93％RHの４種類）を入れたデシケータを設置する。その中に吸湿過程の場合は絶乾状態の試験片を、放湿過程の場合は飽水状態の試験片を温・湿度計とともに入れて密閉し、試験片が湿気平衡状態に達するまで放置した（図－１）。代表試験片（厚さ15mm）の重量を１週間程度の間隔毎に測定し、重量変化量から湿気平衡状態に達したかどうかを判断し、試験片が湿気平衡状態に達した後に各試験片の重量を再度測定した。なお、各試験片の絶乾重量（105°C、24h強制乾燥）と飽水重量（試験片作製後さらに30日以上水中浸漬）および水中における見かけの重量は、デシケータ内に試験片を設置する前（または湿気平衡状態時の重量測定を行った後）に測定した。以上の物理量から平衡含水率関係を算定した。

3.2 熱伝導率

熱流計法（JIS A 1412-2）によって熱伝導率の測定を日本建築総合試験所にて行った。試験体の上下面（広面）はシリコンゴムで、側面はビニルテープで断湿した。まず初めに20℃、55%RHで気中養生した試験体（重量含水率は約3.5wt%：中湿）について測定を行い、次に重量含水率を4.5～5.0wt%（高湿）、1.5～2.0wt%（低湿）と順に変えて熱伝導率の測定を行い、最後に絶乾状態における熱伝導率の測定を行った。含水率は、事前に測定しておいた絶乾重量と散水後ラッピングして気中で養生した試験体の重量の測定値から算出し、散水量を変えることで含水率の調整を行った。設定した温度差は15℃で（高温側が27.5℃、低温側が12.5℃）、1体あたりの試験時間は2～3時間程度である。なお、熱伝導率の測定では潜熱の影響をできるだけ取り除くことに留意する必要がある。本測定では後述する簡易な評価手法によって、潜熱の影響の程度が十分小さいことを確認している。

3.3 湿気伝導率

カップ法³⁾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。パラフィンで側面を断湿した試験片で所定の飽和塩水溶液（LiCl：11%RH、MgCl₂・6H₂O：33%RH、NaCl：75%RH、KNO₃：93%RHの4種類）が入ったガラスカップに蓋をし、恒温・恒湿槽内（20℃、55%RH）に設置して（図－2）、これらの重量変化量を定常になるまで測定した。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。次に、恒温・恒湿槽内の温度のみを30℃に変えて同様の測定を行った。また、高湿時の湿気伝導率を得るために、カップ内の飽和塩水溶液を水（100%RH）に変え、恒温・恒湿槽内の設定も20℃、83%RHに変えて測定を行った。

4. 測定結果と考察

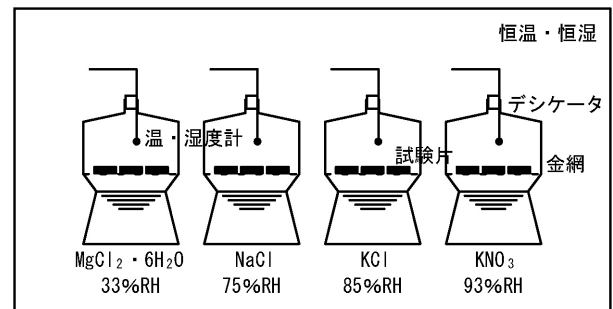
4.1 平衡含水率

図－3は、代表試験片の重量変化を絶乾重量との差で表したものである。ある程度時間が経つと放湿過程で重量が増加したり、吸湿過程で重量が減少したりする現象が見られた。このことは外乱が影響していると考えられたので、連続する3つの測定値の時間平均重量の変化量を求め、それが0.05g/週以下（誤差にして3%以下）になったときを湿気平衡に達したものと判断した。

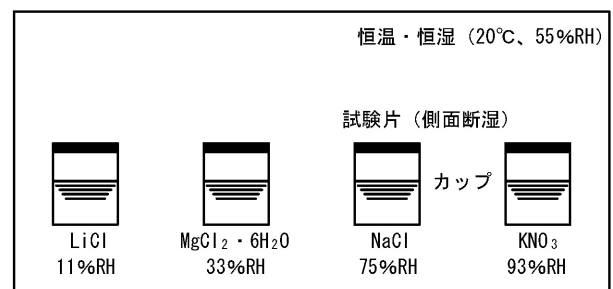
表－6に得られた平衡含水率を示す。図－4は得られた平衡含水率関係（平衡含水率と相対湿度との関係）を

強度別に示したもので、図－5は平均値で平衡含水率関係を示したものである。色付き表示が吸湿過程の結果を、白抜き表示が放湿過程の結果を示す。どの強度のコンクリート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（履歴）が確認された。吸湿過程では、低湿度および高湿度（33%、93%）に比べて中湿度（75%、85%）での実測値に比較的ばらつきが大きい。Fc60を除いた場合、図－6にモデル化したように吸湿過程における平衡含水率関係では圧縮強度が高いほど平衡含水率は低く、強度の違いによる差は小さい傾向にある。逆に放湿過程における平衡含水率関係では強度が高いほど平衡含水率は高く、強度の違いによる差は大きい傾向にある。以上のことは図に示した空隙構造の違いが原因と考えられる。なお、Fc60はセメント成分の違いから吸水率が異なるため、比較対象から外した。

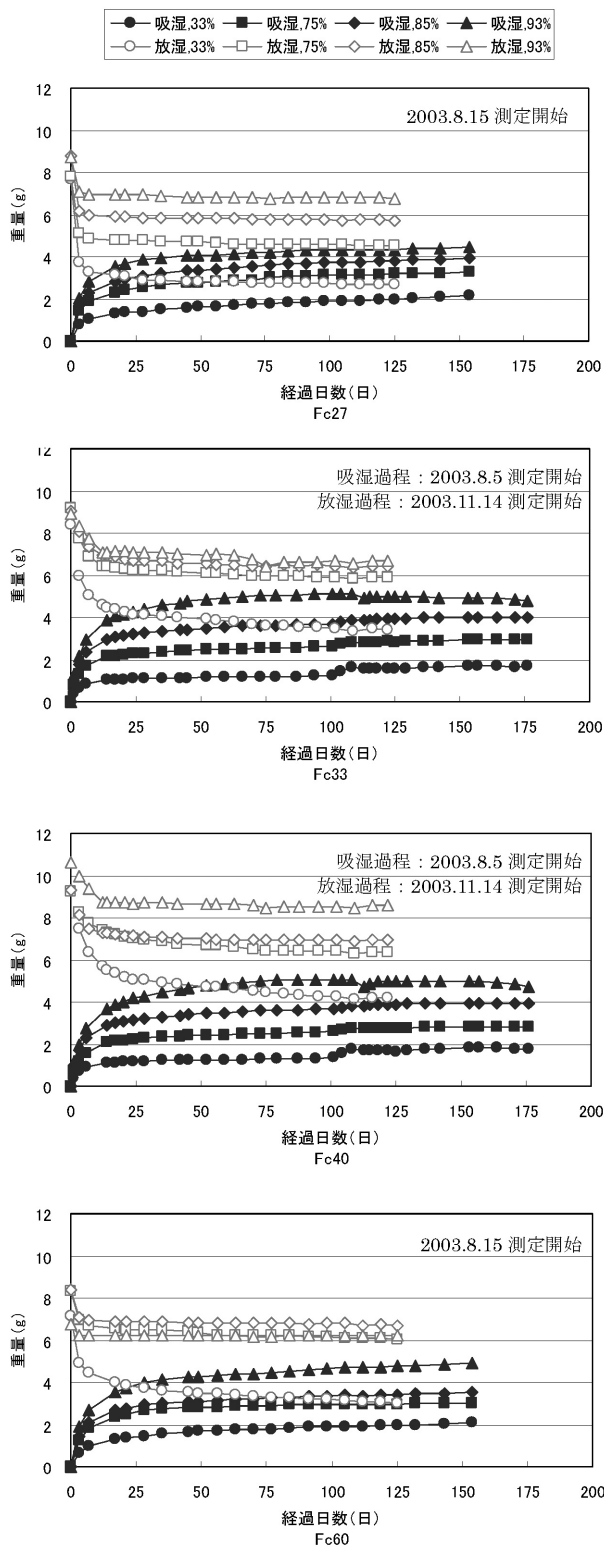
図－7(1)、(2)は平衡含水率の測定結果と文献値とを比較したものである。計算に通常用いられている文献値³⁾と比較して全般的に実測値の方が大きい。これは、文献値の測定された時期が古く、近年のコンクリートと品質そのものが異なるためと考えられる。文献^{4)~1)}では放湿過程の実測値が文献値よりも若干高めではあるが、測定された時期が新しいため、測定結果と極端な違いは見られなかった。



図－1 簡易デシケータ法の概要



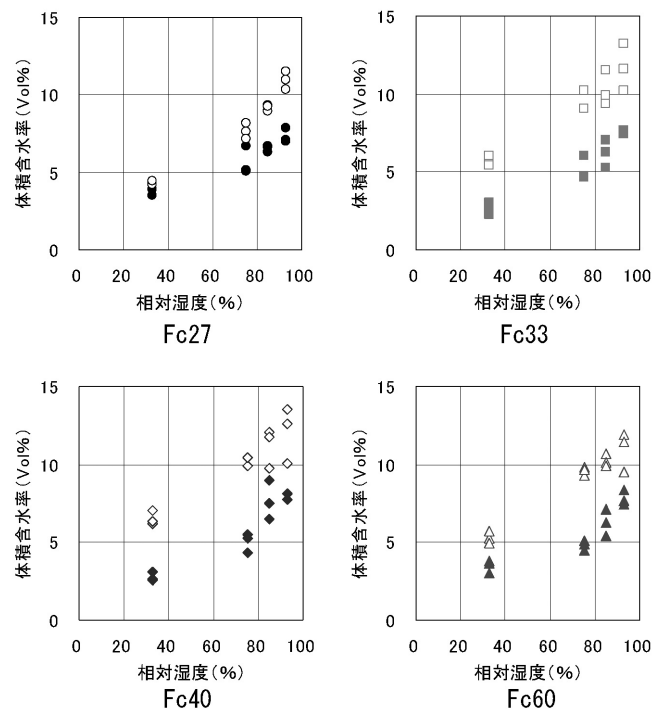
図－2 湿気伝導率測定法の概要



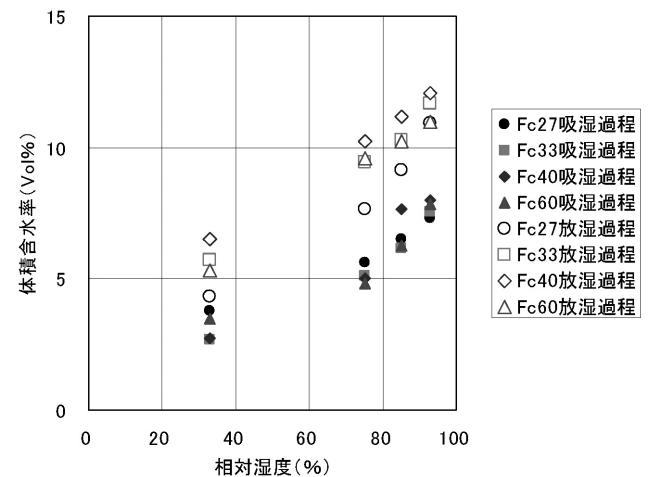
図－3 代表試験片の重量変化量

表－6 平衡含水率の測定結果（平均値）

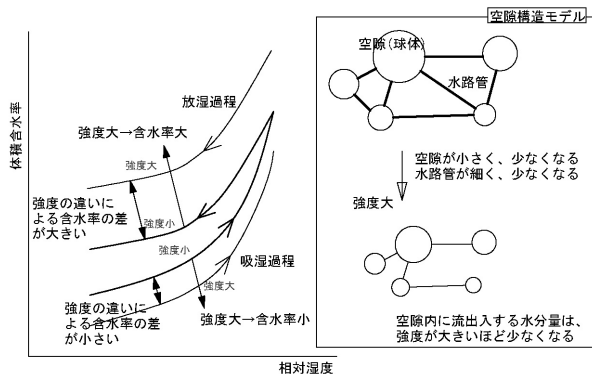
強度	吸湿 放湿	相対 湿度 (%)	体 積 含 水 率 (Vol%)	強度	吸湿 放湿	相対 湿度 (%)	体 積 含 水 率 (Vol%)
Fc27	吸湿	32.8	3.764	Fc40	吸湿	36.8	2.726
		72.7	5.607			75.9	5.016
		86.1	6.530			83.7	7.632
		95.8	7.306			92.1	7.976
	2003.8.15～2003.12.19				2003.8.6～2004.1.28		
	放湿	32.9	4.321		放湿	32.9	6.514
		74.1	7.631			74.3	10.254
		85.8	9.153			84.8	11.181
		96.2	10.927			93.3	12.085
	2003.8.15～2004.1.16				2003.11.17～2004.3.15		
Fc33	吸湿	36.8	2.677	Fc60	吸湿	32.8	3.483
		75.9	5.120			72.7	4.827
		83.7	6.171			86.1	6.243
		92.1	7.543			95.8	7.830
	2003.8.6～2004.1.28				2003.8.15～2003.12.19		
	放湿	32.9	5.720		放湿	32.9	5.294
		74.3	9.423			74.1	9.586
		84.8	10.263			85.8	10.213
		93.3	11.665			96.2	10.962
	2003.11.17～2004.3.15				2003.8.15～2004.1.16		



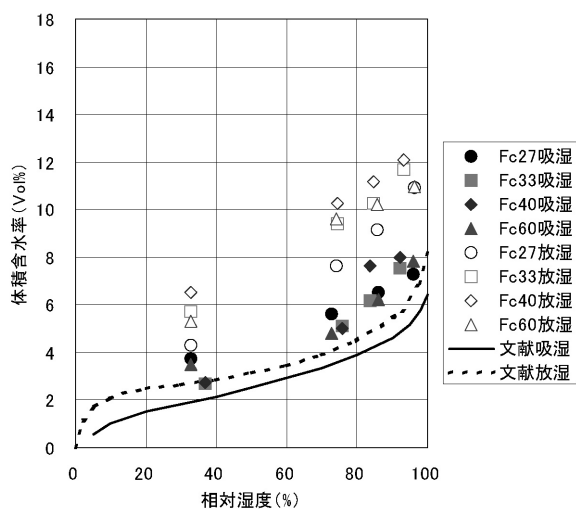
図－4 コンクリートの強度別の平衡含水率関係



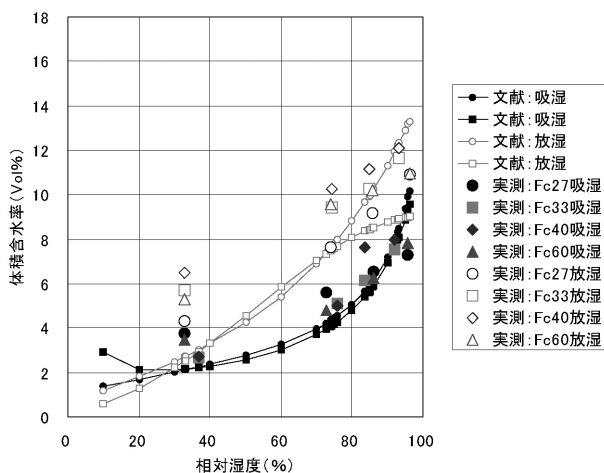
図－5 コンクリートの平衡含水率関係（平均値）



図－6 コンクリートの強度と平衡含水率との関係
および空隙構造モデル



(1) 測定結果（平均値）と文献³⁾との比較



(2) 測定結果（平均値）と文献⁴⁻¹⁾との比較

図－7 平衡含水率の測定結果と文献値との比較

4.2 熱伝導率

測定結果を表－7に示す。図－8は20℃、55%RH、中湿状態（平均で3.74wt%）における強度別の熱伝導率の測定結果を度数分布で表しており、測定値のばらつきを示している。図－9は、重量含水率に対応する各強度の熱伝導率の平均値を近似直線とともに示している。この結果と文献値^{4-1, 4-2)}とを比較したものを図－10に示す。

既知のとおり、含水率が高くなるほど熱伝導率が大きくなる傾向が得られた。しかし、強度が高くなるほど熱伝導率は大きくなると予測されたが、実際には、強度の影響は小さく、粗骨材の単位量の大小関係（100－細骨材率）[Fc27>Fc60>Fc40>Fc33]の影響が大きいと考えられる。また、全体的に実測値のばらつきが大きく、特にFc60において顕著であった。水分移動の影響をできるだけ排除した本実験において、これだけ大きなばらつきが発現したことは、コンクリートそのものがこのような物性を持つ材料といえる。このことは、熱負荷や結露等の検討を行う際に考慮すべき重要な事項と考える。なお、測定前後における試験体の重量変化は非常に小さかった（重量比で平均0.0035%）。その影響（＝蒸発潜熱）および試験中における試験体での水分移動が実測値に与える影響が小さいことについては、後述する簡易検討により確認している。

本測定では、計算等に一般的に用いられている文献値（1.3W/mK～1.5W/mK（湿潤：80%）³⁾）に近い値が得られた。ただし、海外の文献値^{4-1, 4-2)}と比較した場合、本測定結果はかなり小さい。これは、コンクリートの調合に用いられる材料、特に粗骨材が国内外で異なることが原因と推測される。

4.3 湿気伝導率

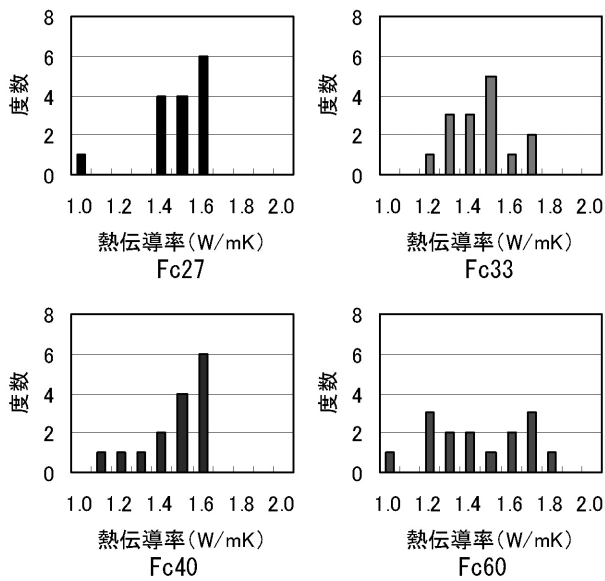
高湿時を含めたコンクリートの湿気伝導率の測定結果を表－8（高湿時は表の網掛け部）に示す。図－11、12は高湿時を除く設定温度20℃の結果で、図－13は設定温度30℃の結果である。また、両者を比較したものを図－14に示す。さらに、図－15に設定温度20℃の結果（高湿時を含む）と文献値⁴⁻³⁾とを比較したものを示す。

コンクリート強度が高くなるほど湿気伝導率は小さく

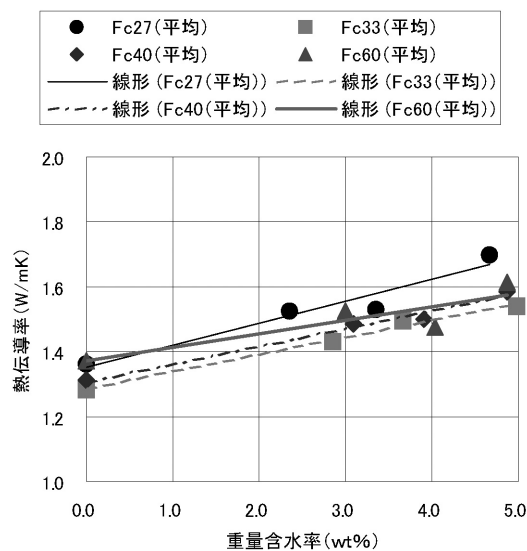
表－7 熱伝導率の測定結果（平均値）

	Fc27	Fc33	Fc40	Fc60
絶乾0wt%	1.36	1.28	1.31	1.37
低湿2.26～3.17wt%	1.53	1.43	1.49	1.53
中湿3.35～4.17wt%	1.53	1.50	1.50	1.47
高湿4.44～5.09wt%	1.70	1.54	1.59	1.61

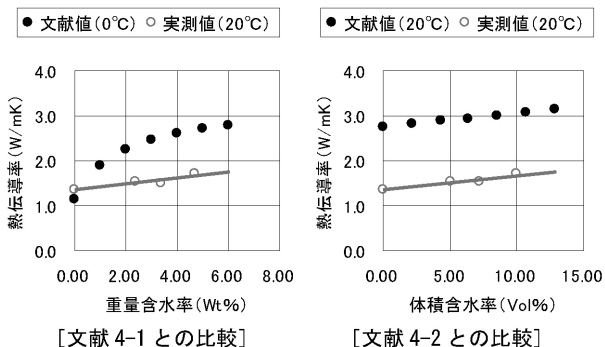
（単位：W/mk）



図－8 強度別の熱伝導率の度数分布
(20℃、55%RH中湿状態3.74wt%)



図－9 重量含水率に対応する各強度の熱伝導率



[文献 4-1 との比較]

[文献 4-2 との比較]

図－10 熱伝導率の測定結果と文献値との比較

なる傾向が見られた。実測値に多少のばらつきが見られるが、その較差は小さく、強度や相対湿度の影響は見られなかった。文献⁴⁾に記されるように相対湿度が高いほど湿気伝導率は大きくなり、特に高湿時には急激に大きくなる傾向が見られた。得られた数値と文献値との間に大きな違いは見られなかった。しかし、計算に通常用いられている値 ($2.9 \times 10^{-12} \text{ kg/msPa}$, $\text{RH}=72\%$)³⁾と比較すると、実測された湿気伝導率は非常に小さい値であった。これは、文献値³⁾が実測された時期が古く、近年のコンクリートと品質そのものが異なるためと考えられる。

恒温・恒湿槽の温度のみを20℃から30℃に高くした場合、得られた湿気伝導率は小さくなった。この理由を考察する。はじめに材料内の水分移動において、水蒸気移動が支配的である場合、材料内の空気はほぼ静止空気と考えられるので、温度が20℃から30℃に変化すると、Schirmerの式⁴⁾により静止空気の湿気伝導率は1.03倍と若干増加する。よって、水蒸気移動が支配的である場合、得られる湿気伝導率は若干大きくなり、測定結果を説明できない。次に、液水移動が支配的である場合、水分移動は相対湿度に大きく依存する含水率差が主な駆動力となるので、温度が20℃から30℃に変わると飽和塩水溶液が調整する相対湿度は若干変化するが、その変化は概ね小さいことから、水分流は温度変化の影響を受けずに等しくなる。相対湿度差が変わらなくても温度が20℃から30℃に変わると水蒸気圧差が大きくなるので、水分流が等しいのなら計算で得られる湿気伝導率は小さくなるはずである。これは測定結果を説明できる。しかし、実際には水分流が増加していることから、液水移動のみでも説明できない。以上からコンクリート内の水分移動には液水と水蒸気の両方が存在していたと考えられる。この温度のみを高くした場合に得られる湿気伝導率が小さくなるという現象は、影響の差こそあれ、測定を行った湿度域全体で生じており、コンクリートでは比較的低湿度であっても液水移動が生じていると考えられる。なお、20℃と30℃での湿気伝導率の差は、強度が低いFc27で最も顕著であった。

4.4 熱伝導率測定時における潜熱の影響

水蒸気流による熱流の大小の評価について、ISOは次のような簡易な評価法を提案している⁶⁾。次式の条件が満たされる場合、水蒸気流による熱流の影響を無視できる。

$$\lambda \gg \left| \frac{r q_v}{\nabla T} \right| \quad (7)$$

液相水分流が0となる含水率を限界含水率と言い、限

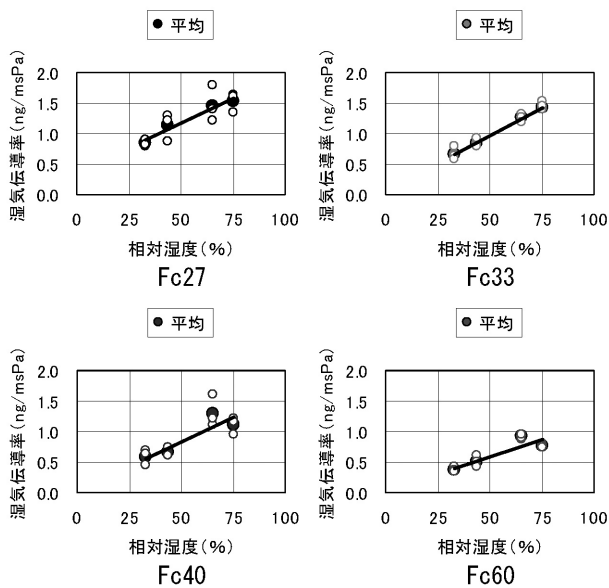


図-11 コンクリートの強度別の湿気伝導率 (20℃)

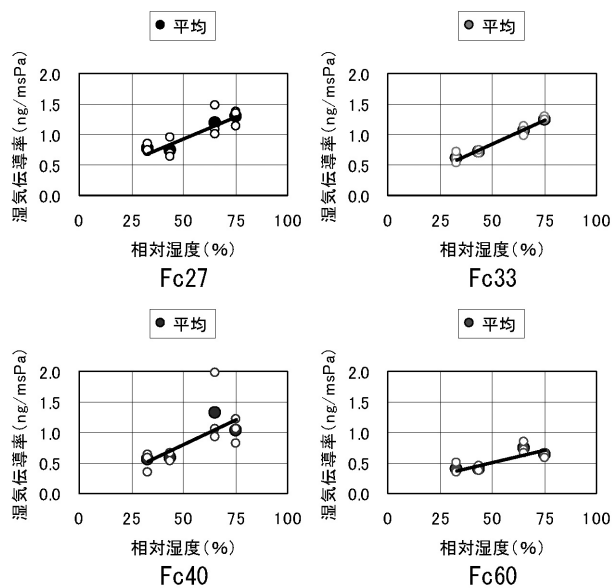


図-13 コンクリートの強度別の湿気伝導率 (30℃)

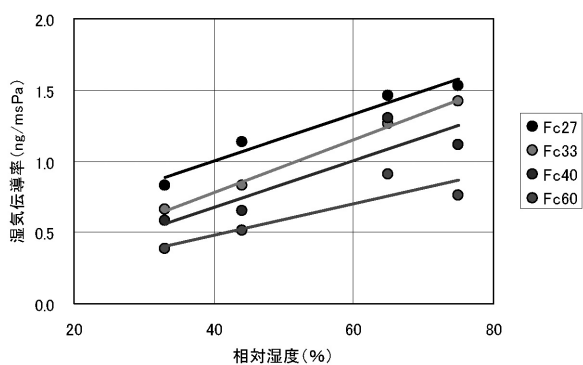


図-12 コンクリートの湿気伝導率 (平均値、20℃)

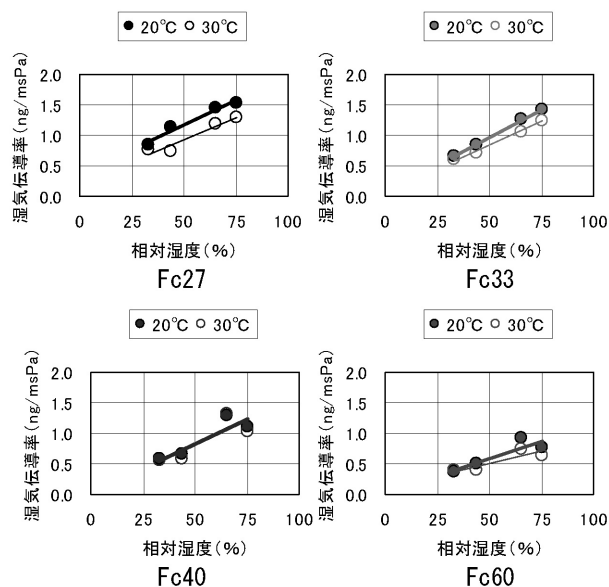


図-14 湿気伝導率の測定結果の比較 (20℃と30℃)

強度	設定温度 (%)	相対湿度 (%)	湿気伝導率 (ng/msPa)	強度	設定温度 (%)	相対湿度 (%)	湿気伝導率 (ng/msPa)
Fc27	20	92	4.98	Fc40	20	92	3.71
		75	1.53			75	1.11
		65	1.46			65	1.30
		44	1.13			44	0.65
		33	0.83			33	0.58
	30	75	1.29		30	75	1.02
		65	1.18			65	1.31
		44	0.75			44	0.57
		33	0.76			33	0.54
		33	0.76			33	0.54
Fc33	20	92	4.92	Fc60	20	92	2.12
		75	1.42			75	0.76
		65	1.26			65	0.91
		44	0.83			44	0.51
		33	0.66			33	0.38
	30	75	1.25		30	75	0.63
		65	1.05			65	0.74
		44	0.70			44	0.39
		33	0.61			33	0.40
		33	0.61			33	0.40

表-8 湿気伝導率の測定結果 (平均値)

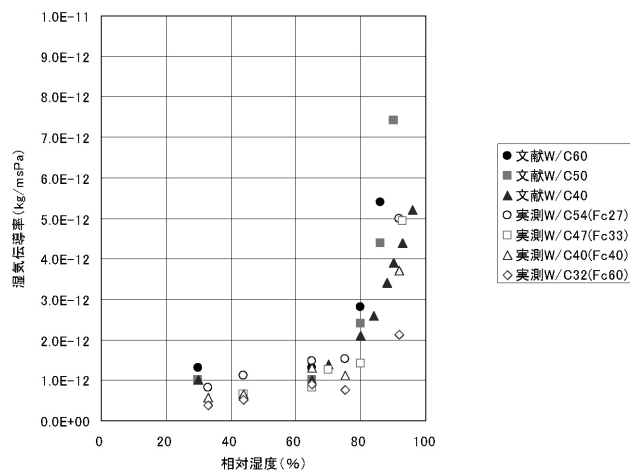


図-15 湿気伝導率の測定結果と文献値⁴⁻³⁾との比較

界含水率以上ではそれと平衡する水蒸気圧は、ほぼ飽和水蒸気圧とみなすことができる。この時の水蒸気流は、

$$q_v = -\lambda' \frac{\partial P_{vs}}{\partial T} \nabla T \text{ となり、(7)式は } \lambda \gg r\lambda' \frac{\partial P_{vs}}{\partial T} \text{ となる。}$$

今回測定したFc27 (20℃、65%RH) の湿気伝導率 λ' (=1.46ng/msPa)、測定時材料内平均温度 $T=293.15\text{K}$ を用いて計算すると上式の右辺は 5.14×10^{-4} となり、これは測定結果 (Fc27) の熱伝導率 λ (=1.53W/mK) に比べて十分小さい。よって、今回の熱伝導率測定において潜熱の影響は十分小さいと判断できる。

5. 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、強度の違いがそれらに与える影響を知るために、4種類の異なる強度のコンクリート (Fc27、Fc33、Fc40、Fc60) について測定を行い、既往の文献値と比較した。その結果を以下に示す。

(1) 平衡含水率

- いずれの強度のコンクリート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。
- コンクリートの強度の違いによって空隙の構造 (形や大きさ) や量が異なると考えられ、そのことが平衡含水率関係にも影響を及ぼす。
- 測定された時期が比較的新しい文献の場合、実測値と文献値との間に大きな違いは見られなかった。

(2) 熱伝導率

- 熱伝導率の測定結果のばらつきが顕著であった。つまり、コンクリートは熱伝導率に関してある幅のばらつきを持つ材料であり、熱負荷や防露問題を考える上で、この特性をどのように取扱うのかを考慮する必要がある。
- 測定結果は海外の文献値よりも小さく、国内の文献値とは大きな違いが見られなかった。その理由は、用いられる粗骨材が国内外で異なるためと思われる。

(3) 湿気伝導率

- 含水率に対応して湿気伝導率は大きくなる傾向にあり、特に高湿時には湿気伝導率は急激に大きくなる。
- 強度が小さいほど (水セメント比が大きいほど) 湿気伝導率は大きくなる傾向が確認された。
- 恒温・恒湿槽の温度のみを20℃から30℃に変化させた場合、測定した全強度、全湿度で湿気伝導率は小さくなった。この結果より、コンクリートは低湿度域でも液水移動の影響があるものと推察される。
- 測定された時期が比較的新しい文献の場合、実測値と文献値との間に大きな違いは見られなかった。

[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))、 $\lambda'_{\mu l}$: μ 勾配に関する液相水分伝導率 (kg/ms(J/kg))、 λ'_T : 温度勾配に関する水分伝導率 (kg/msK)、 λ'_{Tg} : 温度勾配に関する気相水分伝導率 (kg/msK)、 λ'_{Tl} : 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)、 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、大阪産業大学教授 (神戸大学名誉教授) 故松本衛先生と京都大学教授鉾井修先生にご指導いただきました。ここに感謝の意を表します。故松本先生におかれましては、ご生前のご厚情に深く感謝するとともに、故人のご功績を偲び、謹んで哀悼の意を表します。

[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) 建築設計資料集成1環境、丸善、1978
- 4) M.K.Kumaran：建築材料の熱・空気・湿気物性値、日本建築学会編・訳、丸善、2001
- 4-1) Catalogue of Material properties (upgraded version), Report Annex XIV, Page 2.2
- 4-2) Laboratoire de Thermique des Matériaux et des Bâtiments, ISNA, Toulouse France, Beton Siliceux
- 4-3) Goran Hedenblad, Lund University Doctoral Dissertation, Moisture Permeability of Mature Concrete, Cement Mortar and Cement Paste, 1993
- 5) 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」、2001、pp.25~32
- 6) ISO 10051 Thermal insulation Moisture effects on heat transfer-Determination of thermal transmissivity of a moist material