

タイル張り仕上げが施されたコンクリート壁体における
熱水分移動に関する基礎研究

平成 21 年 3 月

恩 村 定 幸

序文

本論は、タイル張り仕上げが施されたコンクリート壁体への水分浸透および壁体内部における熱水分の移動性状について、基礎的な研究を行ったものである。

平成 17 年、東京中央区の 8 階建て雑居ビルの外壁からタイルが張り付けモルタルとともに剥落し、直下を通行していた女性が重傷を負った。剥落部分の面積は 35m²で、重量は 785kg であった。この事故を受け、国土交通省は建物の外壁調査を全国の地方自治体に通知した（「既存建築物における外壁タイル等落下防止対策について」）。その結果、外装材落下のおそれがあるとされた建物は 927 件で、調査した建物の約 8% が危険と判断された。調査は、容積率 400% 以上の中心市街地および避難道路や避難地に面する地域に建つ 3 階建て以上、かつ、竣工後 10 年以上を経過した建物で、外装材の落下によって危害を与えるおそれのある傾斜した外壁を対象としている。対象地域、階数、竣工後経過年数、外壁の形状等を限定せずに調査が実施されたならば、外装材落下の危険性の高い建物は膨大な数に達したと推定され、外装材をタイルに絞ってもかなりの数にのぼると考えられる。

壁体の表層は、日射や夜間放熱によって伸縮を繰り返すが、外装材（タイルと張り付けモルタル）とコンクリート躯体とでは伸縮の大きさが異なり、両者の間にせん断力が生じる。そのため、応力に耐えられなくなった部分の外装材がやがて躯体から浮き上がり、外装材と躯体との間に隙間ができる。この現象は「浮き」と呼ばれている。その際、タイルと目地モルタルとの間にもせん断力が生じるので、そこにも隙間が生じる。これらの隙間に雨水が浸透すると、含水率分布、温度分布が変わり、それに対応して伸縮の大きさも変化する。また、水分の乾燥による収縮でモルタル部分やコンクリート躯体にひび割れが生じた場合、伸縮の大きさがさらに変化するうえ、水分の移動も加速する。壁面の温度上昇が激しい場合には、水分蒸発に伴う内部圧力の上昇の影響もさらに加わる。これらの水分の影響と熱の影響とが相互に作用し増大するため、「浮き」は徐々に広がりを見せ、やがて重量に耐えられなくなり、最後には外装材の剥落に至る。以上が、タイルの一般的な剥離・剥落進行のメカニズムであるが、実際には、それに材料の不具合、施工不良、振動（交通や工場、風による振動および地震）の影響、酸性雨などによる化学的な影響、等の種々の要因が複雑に関係しあうため、タイル剥落問題はより一層複雑なものとなる。しかしながら、熱と水分が大きな影響を持つ要因であることは間違いない。

以上のことから、タイルが張られたコンクリート壁体にどのように水分が浸透し、移動していくかを事前に把握しておくことは重要であり、本論では、そのために各種実験および解析を行っている。

一方、躯体のコンクリートに注目すると、近年、建物の多様化や高層化にともない以前よりも高強度の様々なコンクリートが用いられている。また、コンクリートは、用いる材料の種類や量および状態、養生を含めた製造過程における気象条件や手順、さらには製造者の熟練度、打設場所、仕

上げの有無など、様々な違いが影響するため、常に安定した品質が得られる材料ではない。安全上、最も重要視される強度においても $8.0\sim 12.0\text{ N/mm}^2$ 程度のばらつきが生じる。このように品質のばらつきが生じる可能性のあるコンクリートに対して、熱水分の移動を解析する際、多くの研究者はコンクリートの物性値として 1957 年以前の測定結果を使用している。

以上のことから、本論では強度の異なるコンクリートの熱湿気物性の測定を行うとともに、ばらつきの程度についても検討する。

本論の目的は、コンクリートの熱湿気物性の特徴を明らかにすること、および、タイル張り仕上げが施されたコンクリート壁体における水分移動の解析的な予測を可能にすることである。解析によって得られる温度および含水率分布は、熱応力や乾燥収縮応力の算定の基礎となり、本論での成果は浮きが発生しない壁体の設計のみならず、タイルの剥離・剥落問題の解明にも有効に利用される。

第 1 章では、本論に関連するこれまでの研究のレビューを行っている。また、コンクリートの熱湿気物性値に関する問題についても概説している。

第 2 章では、本論の解析で用いる熱水分移動の基礎方程式を提示し、数値計算方法を記述している。

第 3 章では、現在、一般的に用いられている強度の異なる 3 種類のコンクリートについて、湿気伝導率、平衡含水率、透水系数および熱伝導率の測定を行っている。各熱湿気物性と強度・含水率・温度との関係、物性値のばらつきの度合いや傾向を明らかにするとともに、コンクリートが比較的低温度であっても気相水分（水蒸気）だけではなく液相水分の移動も生じていることを明らかにする。また、測定結果と国内外の文献値との比較も行っている。

第 4 章では、タイルが張られたコンクリート壁体への水分浸透および壁体内での水分移動の挙動を把握するために行った吸水実験の概要と結果について述べている。

第 5 章では、第 6 章以降の解析に必要なコンクリートの水分化学ポテンシャル勾配および温度勾配に関する水分伝導率の気液分離方法を示し、湿気伝導率測定における水分流の解析結果から各水分伝導率の値を決定している。

第 6 章では、第 5 章で決定した水分伝導率を用いた 2 次元非定常計算によって含水率の経時変化を算出し、第 4 章の測定結果と比較している。

第 7 章では、第 6 章の結果を受け、強度の違いや物性値のばらつきを考慮した解析を行っている。解析の結果より、タイル張り仕上げが施された場合であってもコンクリート壁体の水分移動性状の予測は可能であり、強度の違いや物性値のばらつきを考慮することで、さらに予測精度が高くなることを示している。

第 8 章では、第 4 章の吸水実験で行われた加振や加熱がコンクリートの湿気物性の変化やタイルの浮きの発生に与える影響を、実験および解析によって検討し、その結果を受けて今後の課題を示している。

目 次

第 1 章 序論

1-1	はじめに	1
1-2	多孔質材料内部における熱水分移動の理論解析に関する研究	2
1-3	コンクリートの熱水分移動に関する物性値	3
1-4	壁体への水分浸透に関する研究	3
1-5	コンクリート壁体内部における熱水分の移動性状に関する研究	4
1-6	本論の目的と概要	5

第 2 章 多孔質体内部における熱水分移動の基礎式方程式

2-1	はじめに	7
2-2	多孔質材料内の熱水分同時移動の基礎式	7
2-2-1	多孔質材料内の拡散方程式	7
2-2-2	支配方程式	11
2-2-3	本論で用いる基礎方程式	13
2-2-4	境界条件	15
2-2-5	数値計算方法	17
2-3	本章のまとめ	19

第 3 章 コンクリートの熱湿気物性の測定

3-1	はじめに	21
3-2	試験体と試験片	23
3-3	湿気伝導率の測定	26
3-3-1	測定方法	26
3-3-2	重量変化の測定結果	27

3-3-3	湿気伝導率の算定結果と考察	32
3-3-4	湿気伝導率算定に用いた湿気伝達率・湿気伝達抵抗（文献値）の影響	42
3-4	平衡含水率の測定	44
3-4-1	測定方法	44
3-4-2	重量変化の測定結果	45
3-4-3	平衡含水率の算定結果と考察	52
3-4-4	絶乾および飽水期間についての考察	54
3-5	透水係数の測定	56
3-5-1	測定方法	56
3-5-2	水分の移動速度の測定結果	57
3-5-3	透水係数の算定結果と考察	59
3-6	熱伝導率の測定	60
3-6-1	測定方法	60
3-6-2	測定結果と考察	62
3-6-3	潜熱の影響	64
3-6-4	含水率分布の一様性	66
3-7	文献値との比較	68
3-7-1	湿気伝導率	68
3-7-2	平衡含水率	71
3-7-3	透水係数	74
3-7-4	熱伝導率	75
3-8	本章のまとめ	76

第4章 タイル張り仕上げが施されたコンクリート壁体への水分浸透

4-1	はじめに	80
4-2	試験体	80
4-2-1	試験体の作成	80

4-2-2	試験体の諸元	84
4-3	γ 線含水率測定装置を用いた吸水実験	86
4-3-1	概要	86
4-3-2	測定結果と考察	89
4-4	本章のまとめ	110

第5章 解析に用いるコンクリートの水分伝導率

5-1	はじめに	112
5-2	計算方法	113
5-3	計算に用いた数値	120
5-4	計算結果と考察	122
5-5	本章のまとめ	126

第6章 吸水実験の解析

6-1	はじめに	127
6-2	計算条件	127
6-2-1	解析対象	127
6-2-2	基礎式と境界条件	128
6-2-3	初期条件	130
6-2-4	計算に用いた数値	130
6-2-5	計算方法	131
6-3	計算結果および考察	137
6-4	本章のまとめ	143

第7章 強度の違いと物性値のばらつきが水分浸透に及ぼす影響

7-1	はじめに	144
7-2	水分伝導率および平衡含水率曲線の検討	145

7-3	計算結果および考察	150
7-4	本章のまとめ	162
第8章 振動および加熱が水分浸透に及ぼす影響		
8-1	はじめに	164
8-2	切断時の振動の影響	164
8-3	乾燥時の加熱の影響	167
8-4	タイルの浮きについて	168
8-5	解析による検討	170
8-6	今後の課題	190
8-7	本章のまとめ	191
第9章 結論		
付録A-1	吸水実験の結果 試験体 No1 における体積含水率の経時変動	195
付録A-2	吸水実験の結果 試験体 No3 における体積含水率の経時変動	203
付録B	周辺雰囲気温度および相対湿度の変動が解析結果に及ぼす影響	208
付録C	水分移動に関する物性値と骨材分布との関係	213
引用文献		217
記号		223
本研究に関連する発表論文一覧		228
謝辞		231

第1章 序論

1-1 はじめに

本論では、タイル張り仕上げが施されたコンクリート造建物の外壁を対象とする。

コンクリート壁体に張られたタイルは時間の経過とともに一部で浮きが生じ、やがて剥離に至ることがある。最悪の場合、剥落による重大な事故を引き起こすこともある。これに対しては、先ずなすべきことはタイルの浮きを発生させないことであり、これまでも材料の開発や施工面での改善など、種々の対策が施されてきた。しかしながら、未だ完全な解決には到っておらず、今後もあらゆる面での努力が必要とされている。

浮きの発生およびそれを促進させる要因として、

- ・日射や外気温変動による冷暖の繰り返しで生じる熱応力の影響
- ・降雨や外気相対湿度変動による乾湿の繰り返しで生じる乾燥収縮応力の影響

があげられる [1]。これら熱と水分による影響は相互に関係しあう。したがって、タイル張り仕上げが施されたコンクリート壁体内の熱水分の挙動（温度および含水率の変化）性状を明らかにすることは、浮きが発生しない壁体の設計はもとよりタイルの剥離・剥落問題を解明するうえで重要である。

このようなコンクリート壁体内の熱水分の挙動は、コンクリートが内部に空隙を有する多孔質材料であることより、多孔質材料中での熱水分同時移動に関する解析によって検討することが可能と考えられる。

以上のことから、本章では最初に、多孔質材料内部における熱水分移動に関する従来の研究について述べる。次に、解析に用いられるコンクリートの熱水分移動に関する物性値について、続いて、壁体への水分浸透およびコンクリート壁体内部における熱水分の移動性状に関する従来の研究について述べる。なお、浮きの発生要因として温度上昇に伴う水分蒸発の結果として生じる内部圧力の上昇の影響もあるが、常温域では相対的に小さいと考えられるので、本論ではまずは重要度の高い熱と水分を取り上げる。

1-2 多孔質材料内部における熱水分移動の理論解析に関する研究

多孔質材料内部における熱水分の移動については古くから研究がなされており、多くの成果が報告されている。

多孔質材料内部の熱と水分の同時移動を統一的に扱ったものとしては、Philip と De Vries [2] のモデルがある。彼らは、土壌内の熱水分移動について、水蒸気移動に対しては修正された Fick の法則を、液水移動に対しては不飽和流れに対して拡張された Darcy 則を用い、温度勾配がある場合の水分移動を含水率勾配によるものと温度勾配によるもので表現した。さらに、熱移動については相変化を考慮した式を提示した。

Luikov ら [3]、[4] は多孔質材料を毛細管コロイド材料としてとらえ、水蒸気は分子とモルの移動、液水は毛細管ポテンシャルと浸透圧による移動とし、これらの移動を毛細管分布を考慮して定式化し、含水率勾配と温度勾配による移動方程式を導出した。また、Prigogine [5]、De Groot [6] 等の非平衡熱力学の理論を多孔質材料の熱水分移動問題に初めて適用し、現象論的方程式を統一的に把握した。

乾燥工学の分野では、Krischer [7] が熱水分同時移動方程式を提示し、同時に種々の材料について広範な移動係数の測定を行っている。

Cary と Taylor [8]、[9]、[10]、[11] は非可逆過程の熱力学から物質とエネルギー流束および駆動力との関係を導き、式中に現われる係数間の関係を実験によって検討し、さらに、各係数の物理内容を明らかにした。

松本 [12]、[13]、[14] は建築壁体の結露過程の解析と壁体内の含水率および熱流の変化の予測を目的に、非可逆過程の熱力学を用いて圧力差による bulk な流れや壁体の変形を含む一般式を導き、多層壁体の問題を解くのに適切な水分の移動ポテンシャルは自由水基準の化学ポテンシャルであることを提示した。さらに、この一般式から従来の現象論的方程式を導き対応させている。

これらの基礎式間の関係は前田、松本 [15]、池田 [16] において明確にされており、Philip と De Vries、Luikov、Krischer の基礎式は松本の温度と水分化学ポテンシャルを移動ポテンシャルとした基礎式に変形される。

以上、多孔質材料内部における熱水分同時移動の基礎式の導出、および基礎式の検討に関する従来の研究について述べたが、本論で用いる基礎式は松本の理論に従う。

1-3 コンクリートの熱水分移動に関する物性値

コンクリート壁体の熱水分の移動性状の解析に関する研究は数多くあるが、そのほとんどは水蒸気移動が支配的な場合を扱ったものであり、気相水分（水蒸気）と液相水分の同時移動を考慮した研究は少ない。

また、計算に用いられる熱水分移動に関するコンクリートの物性値としては、1957年以前の文献値が多く引用されている。例えば、鉄筋コンクリートの湿気伝導率には、斎藤 [17]、[18] らが測定した $2.9 \times 10^{-12} \text{kg/msPa}$ という値が種々の書籍で紹介されており、多くの研究者がその値を解析に用いている。しかしながら、この値は、水：セメント：骨材=1：2：4の調合で、水セメント比が70%のコンクリートを用いて測定されたものである。平衡含水率曲線についても、Johansson と Persson [19] の測定値がしばしば引用されるが、これは1946年に報告されたものである。

現在、コンクリートの JIS 規格における水セメント比の上限は64%である。建築基準法により JIS 規格外のコンクリートは構造体に使用できない。また、建物の多様化や高層化にともない材料技術が進歩し、近年では前述の物性値が測定された当時よりも強度の高い様々なコンクリートが用いられている。

これらの状況から、本論では、現在、一般的に用いられている3種類の強度（Fc27、Fc33、Fc40：Fcは設計基準強度）のコンクリートについて、気相と液相の両方にまたがる熱湿気物性の測定を行う。また、測定結果を基に気液の同時移動について考察する。

1-4 壁体への水分浸透に関する研究

含水率勾配に関する水分伝導率を測定する目的で、建築材料（ALC、砂、漆喰、木）への水分浸透を取り扱った研究報告がある [20]、[21]、[22]、[23]。

また、銚井 [24] は ALC 内に水分が浸透する場合について、散水による蒸発冷却効果を検討している。重松・松本・小椋 [25] は吸水性壁体として ALC 壁を選定し、降雨時や降雨後の蒸発冷却の効果を検討している。恩村・松本・銚井 [26] は芝生植栽に水分浸透がある場合と無い場合について実験および解析を行い、蒸発冷却の効果を検討している。

銚井・伊庭 [27] は、壁体の凍結性状を明らかにする目的で、含水率上昇の要因として雨水を取

り上げ、土壁について水分浸透を考慮した解析を行っている。

岸本・銚井 [28]、[29] は、コンクリート壁体表面のひび割れが内部の熱水分移動性状に及ぼす影響を明らかにするために、雨水と二酸化炭素の浸入を取り扱っている。

以上はいずれも壁体への水分浸透を取り扱っているが、仕上げのあるコンクリート壁体を対象としたものではない。本論では、仕上げとして集合住宅で良く用いられるタイル張り仕上げを取り上げ、その仕上げが施されたコンクリート壁体への水分浸透の様相を実験と解析によって検討する。

1-5 コンクリート壁体内部における熱水分の移動性状に関する研究

コンクリート壁体内部の含水率変動に関しては、これまでいくつかの研究が報告されている。

椎名 [30] は竣工直後の建物のコンクリート構造体（柱、梁、壁、床）における含水率分布測定を長期にわたって行い、得られた測定結果から材厚や材齢に応じて構造体内部の含水率を予測する実験式を提案している。しかし、理論的な解析による体系化はなされていない。

谷沢ら [31]、[32]、[33] は、竣工後の鉄筋コンクリート建造物（集合住宅）における外壁内部の温度および相対湿度と、その建物と同じ壁厚を想定した 30cm×30cm×15cm の大きさの平板形試験体における含水率の長期測定を行うと同時に、同じ調合のコンクリートの平衡含水率関係を測定している。これらの測定結果は貴重な情報と言える。

橋田ら [34]、[35] は直径 30cm、高さ 15cm の円柱形のコンクリート試験体を用いて、表面仕上げ材がない場合と不透湿性の表面仕上げ材がある場合について試験体内部の含水率の測定を行い、非線形拡散モデルによる数値解析によって壁体内の含水率分布が精度良く予測できることを報告している。また、荒井ら [36]、[37]、[38] は、直径 10cm、高さ 20cm の円柱形のコンクリート試験体における含水率変動を測定し、熱水分同時移動モデルによる解析結果との比較からコンクリートの初期の乾燥特性を示し、さらに、築 30 年を過ぎた実建物でのコンクリート構造体（壁、床）内部における含水率分布の測定を行っている。ただし、これらの解析は一定温度環境条件下における水蒸気の移動のみを検討したものであって、液水および熱との同時移動は考慮されていない。

松本・小椋 [39] および中嶋・小椋・松下 [40] は、地下空間を対象に 2次元の熱水分同時移動方程式を用いて土壌とコンクリート壁体、および室内における熱水分の移動性状を詳細に解析して

いる。解析には松本の理論式を用い、コンクリートの水分移動に関する物性値についても比較的最近に測定された値 [41] から推定されたものである。また、前述の岸本・銚井 [28]、[29] も、松本・小椋らと同じ物性値を用いて2次元の熱水分同時移動方程式による数値解析を行っている。しかしながら、これらはコンクリート強度と熱湿気物性との関係、物性値のばらつきの程度とその影響については言及されていない。

本論では測定結果からコンクリート強度と熱湿気物性との関係および物性値のばらつきの程度を明らかにし、その情報を用いた解析によってコンクリート壁体における熱水分(気相および液相)同時移動の検討を行う。

1-6 本論の目的と概要

本論の目的は、タイル張り仕上げが施されたコンクリート壁体への水分浸透および壁体内における水分移動の挙動を実験的に把握すると同時に、解析による予測を可能にすることである。

第2章では、第5章以降の解析で用いる多孔質材料中の熱水分移動の基礎方程式を提示し、数値計算方法についても簡潔に述べる。

第3章では、現在、一般的に用いられている強度の異なる3種類のコンクリートについて、湿気伝導率、平衡含水率、透水係数および熱伝導率の測定を行う。得られた結果から、気液の同時移動について考察する。また、各熱湿気物性と強度・含水率・温度との関係、物性値のばらつきの度合いや傾向等を明らかにする。さらに、測定結果を国内外の文献値と比較する。

第4章では、タイル張り仕上げが施されたコンクリート壁体への水分浸透および壁体内における水分移動の挙動を把握するために、吸水実験を行う。測定装置には非破壊で含水率の測定が可能な γ 線含水率測定装置を用いる。

第5章では、第6章以降の解析に必要なコンクリートの水分化学ポテンシャル勾配および温度勾配に関する水分伝導率の気液分離方法について述べる。また、第3章で得られた熱湿気物性を用いた1次元非定常計算を湿気伝導率測定に対して行い、水分流の計算結果と測定結果との比較から水分伝導率の値を決定する。

第6章～第8章では、第4章で示した吸水実験を解析する。

第6章では、第5章で決定した水分伝導率を用いた2次元非定常計算によって含水率の経時変化を算出し、第4章の測定結果と比較する。

第7章では、第3章で得られた強度の違いや物性値のばらつきを考慮した解析を行い、それにより解がどのように変化するのか、結果の精度がどうなるのかについて検討する。

第8章では、第4章の吸水実験で行われる加振や加熱がコンクリートの湿気物性の変化およびタイルの浮きに与える影響を検討する。簡易な実験によって影響の有無を確認し、解析によって影響の大きさを検討する。

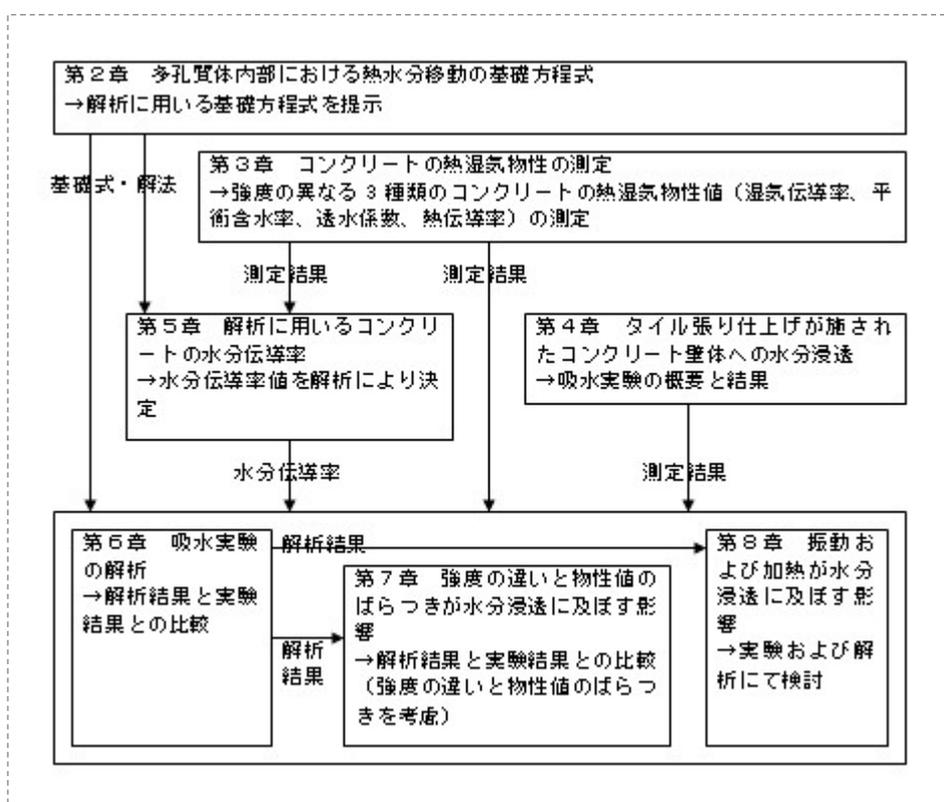


図 1.1 本論の構成

【本章に関連する発表論文】

[1.3] Sadayuki Onmura, Mamoru Matsumoto and Shuichi Hokoi : Study on evaporative cooling effect of roof lawn garden, Energy and Buildings 33, pp.653-666, 2001

[2.1] 恩村、松本、銚井：建築材料の水分拡散特性の測定に関する研究—木材の水分拡散係数の測定、日本建築学会大会学術講演梗概集（北陸）、D環境工学、pp.943～944、1987.8

第2章 多孔質体内部における熱水分移動の基礎方程式

2-1 はじめに

金属やガラスを除いた一般的な建築材料は空隙を有する多孔質体である。これら多孔質体の内部の熱および水分の移動は同時移動現象である。この現象を記述する熱水分同時移動方程式に関する研究はこれまで多く行われているが、大別して以下の三種に分けられる。

- i 現象論的にマクロにみる解析 (Philip と De Vries)
- ii 材料内の空隙を毛細管の束とみるミクロな解析 (Luikov)
- iii 非可逆過程の熱力学を用いて材料内の移動を考慮した解析 (松本)

いずれも最終的には温度と含水率あるいは水分化学ポテンシャルを移動ポテンシャルとし、水分の移動に関しては気相（水蒸気）と液相（液水）の2相の水分収支を、熱移動に関しては熱伝導と移流による熱移動および相変化を含めた熱収支を考える基礎方程式が導かれる。

この整理は、前田と松本 [15] および池田 [16] によってなされており、基礎式の妥当性の検討は松本 [12]、池田 [16] が行っている。本論では松本の研究を基礎とする。

本章では、初めに移動ポテンシャルに温度と水分化学ポテンシャルを用いる松本の理論を示し、多孔質材料内の熱水分同時移動の基礎式を提示する。次に、本論で用いる熱および水分の収支式を示し、これらを本論における基礎方程式とする。

2-2 多孔質材料内の熱水分同時移動の基礎式

2-2-1 多孔質材料内の拡散方程式

多孔質材料内には種々の形態で水分が存在し、それらの水分は平衡状態からのずれ、すなわち水分化学ポテンシャルの差を駆動力として移動する。水分移動の形態は気相水分（水蒸気）と液相水分（毛管水、吸着水などの液水）に大別できるので、多孔質体を不活性な空気と水分、および固体実質部を成分とする混合体とみなし、非平衡熱力学の方法 [6]、[42] を水分移動過程に適用する

と [4]、[8]、[43]、[44]、熱、水分（気相と液相）、空気の流動に関する次の拡散方程式が得られる [12]、[45]。

$$\begin{aligned}
 q &= -D_{00} \nabla T - D_{01} (\nabla m_g - F_w) - D_{02} \nabla P - D_{03} (\nabla m_1 - F_w) \\
 J_g &= -D_{10} \nabla T - D_{11} (\nabla m_g - F_w) - D_{12} \nabla P - D_{13} (\nabla m_1 - F_w) \\
 J_a &= -D_{20} \nabla T - D_{21} (\nabla m_g - F_w) - D_{22} \nabla P - D_{23} (\nabla m_1 - F_w) \\
 J_1 &= -D_{30} \nabla T - D_{31} (\nabla m_g - F_w) - D_{32} \nabla P - D_{33} (\nabla m_1 - F_w)
 \end{aligned} \tag{2.1}$$

行列の対角部の係数 D_{00} 、 D_{11} 、 D_{22} 、 D_{33} はそれぞれ熱伝導率、気相の水分伝導率、透気率、液相の水分伝導率である。 D_{01} と D_{03} は拡散の熱効果を、 D_{02} は圧力の熱効果を示す伝導係数である。 D_{10} は気相水分の熱拡散、 D_{12} は気相水分の圧力拡散、 D_{13} は液相水分の干渉効果を表し、 D_{30} は液相水分の熱拡散、 D_{32} は液相水分の圧力拡散、 D_{31} は気相水分の干渉効果を表す。 D_{20} 、 D_{21} 、 D_{23} も乾燥空気に対する同様な効果を示す項である。

厳密にはこれらの係数をすべて実験によって測定する必要がある。しかし、これらはすべてポテンシャル T 、 m_g 、 P 、 m_1 またはその一部によって変化し、常数と見なすことはできない。また、相互効果に関する項の測定にはかなり高精度な測定が必要であること、気相水分流と液相水分流の区別を外部からつけることの困難さなどから、その測定値を得ることは非常に難しい。

しかしながら、従来の理論や実験結果から次のように近似することができる。

相互効果の程度から判断して $D_{01} = D_{02} = D_{03} = 0$ 、 $D_{13} = D_{31} = 0$ 、 $D_{23} = 0$ と見なしてよい。また、同様に $D_{10} + D_{20} = 0$ 、 $D_{11} + D_{21} = 0$ と近似できる。以上より (2.1) 式は次式のようにになる。

$$\begin{aligned}
 q &= -D_{00} \nabla T \\
 J_g &= -D_{10} \nabla T - D_{11} (\nabla m_g - F_w) - D_{12} \nabla P \\
 J_a &= -D_{20} \nabla T - D_{21} (\nabla m_g - F_w) - D_{22} \nabla P \\
 J_1 &= -D_{30} \nabla T - D_{33} (\nabla m_1 - F_w) - D_{32} \nabla P
 \end{aligned} \tag{2.2}$$

平衡状態からの偏りがあまり大きくない場合、すなわち温度、圧力、水分化学ポテンシャル等の移動ポテンシャルの勾配 (∇T 、 ∇m_g 、 ∇P 、 ∇m_1) が大きくない場合には、温度や圧力と同様に水分化学ポテンシャルも気相と液相間で常に平衡していると見なすことができる（水分の局所平

衡)。そこで、新たに水分化学ポテンシャルを $m = m_g = m_l$ と定義すると、(2.2)式は次式のようになる。

$$\begin{aligned}
 q &= -D_{00} \nabla T \\
 J_g &= -D_{10} \nabla T - D_{11} (\nabla m - F_w) - D_{12} \nabla P \\
 J_a &= -D_{20} \nabla T - D_{21} (\nabla m - F_w) - D_{22} \nabla P \\
 J_l &= -D_{30} \nabla T - D_{33} (\nabla m - F_w) - D_{32} \nabla P
 \end{aligned} \tag{2.3}$$

$J_w = J_g + J_l$ 、 $J_m = J_a + J_g$ より、

$$\begin{aligned}
 q &= -D_{00} \nabla T \\
 J_w &= -(D_{10} + D_{30}) \nabla T - (D_{11} + D_{33}) (\nabla m - F_w) - (D_{12} + D_{32}) \nabla P \\
 J_m &= -(D_{12} + D_{22}) \nabla P
 \end{aligned} \tag{2.4}$$

(2.3)式、(2.4)式における D_{00} 、 D_{10} 、 \dots 、 D_{33} は広義の伝導率であるが、その内容を明示するために以下の記号を用いて表現する。

$$\begin{aligned}
 D_{00} &\rightarrow I, \quad D_{10} \rightarrow I'_{Tg}, \quad D_{30} \rightarrow I'_{Tl}, \quad D_{11} \rightarrow I'_{mg}, \quad D_{33} \rightarrow I'_{ml}, \quad D_{12} \rightarrow I'_{Pg}, \quad D_{32} \rightarrow I'_{Pl}, \quad D_{12} + D_{22} \\
 &\rightarrow k_p, \quad I'_T = I'_{Tg} + I'_{Tl}, \quad I'_m = I'_{mg} + I'_{ml}, \quad I'_P = I'_{Pg} + I'_{Pl}
 \end{aligned}$$

これを用いると、(2.3)式と(2.4)式は次式のようになる [46]、[47]。

$$\begin{aligned}
 q &= -I \nabla T \\
 J_w &= -I'_T \nabla T - I'_m (\nabla m - F_w) - I'_P \nabla P \\
 J_g &= -I'_{Tg} \nabla T - I'_{mg} (\nabla m - F_w) - I'_{Pg} \nabla P \\
 J_l &= -I'_{Tl} \nabla T - I'_{ml} (\nabla m - F_w) - I'_{Pl} \nabla P \\
 J_m &= -k_p \nabla P
 \end{aligned} \tag{2.5}$$

含水率が十分大きく水蒸気流 $J_g = 0$ のとき、 $J_w = J_l$ の式は広義のダルシー式であり、 I'_m はダルシー式の水分伝導率の値と一致する。また、このとき $I'_T = 0$ となり、 $I'_m / r_1 = I'_P$ となる。水分伝導率 I'_m 、 I'_T は含水率（または水分化学ポテンシャル）および温度の関数であり、その値は

乾燥時から飽水時までの含水率の全範囲にわたって含水率と温度に強く依存し、一般には常数として取り扱うことはできない。

また、風圧等により外部から圧力差が加えられる場合や加熱等によって材料内部での水分の相変化（蒸発）速度が大きくなり圧力上昇が生じる場合を除けば、 $\nabla P = 0$ と見なすことができ、(2.5)式は次式のようになる。

$$\begin{aligned}
 q &= -I \nabla T \\
 J_w &= -I'_T \nabla T - I'_m (\nabla m - F_w) \\
 J_g &= -I'_{Tg} \nabla T - I'_{mg} (\nabla m - F_w) \\
 J_l &= -I'_{Tl} \nabla T - I'_{ml} (\nabla m - F_w)
 \end{aligned} \tag{2.6}$$

ここで、

D_{jk} ($j, k = 0, 1, 2, 3$) : 広義の伝導率、 F_w : 水分 1kg に作用する外力 [N/kg、 m/s^2]、 J_a : 乾燥空気流 [$\text{kg/m}^2\text{s}$]、 J_g : 気相水分（水蒸気）流 [$\text{kg/m}^2\text{s}$]、 J_l : 液相水分（毛管水、吸着水などの液水）流 [$\text{kg/m}^2\text{s}$]、 J_m : 湿り空気流 [$\text{kg/m}^2\text{s}$]、 J_w : 水分流 [$\text{kg/m}^2\text{s}$]、 k_p : 透気率 [kg/msPa]、 P : 気相の圧力 [N/m^2]、 q : 熱流 [W/m^2]、 T : 温度 [K]、 I : 熱伝導率 [W/mK]、 I'_p : 圧力勾配に関する水分伝導率 [kg/msPa]、 I'_{pg} : 圧力勾配に関する気相水分伝導率 [kg/msPa]、 I'_{pl} : 圧力勾配に関する液相水分伝導率 [kg/msPa]、 I'_T : 温度勾配に関する水分伝導率 [kg/msK]、 I'_{Tg} : 温度勾配に関する気相水分伝導率 [kg/msK]、 I'_{Tl} : 温度勾配に関する液相水分伝導率 [kg/msK]、 I'_m : 水分化学ポテンシャル勾配に関する水分伝導率 [kg/ms(J/kg)]、 I'_{mg} : 水分化学ポテンシャル勾配に関する気相水分伝導率 [kg/ms(J/kg)]、 I'_{ml} : 水分化学ポテンシャル勾配に関する液相水分伝導率 [kg/ms(J/kg)]、 m : 水分化学ポテンシャル（自由水基準）[J/kg]、 m_g : 気相水分の化学ポテンシャル（自由水基準）[J/kg]、 m_l : 液相水分の化学ポテンシャル（自由水基準）[J/kg]、 r_1 : 水の密度 [kg/m^3]、 ∇ : 空間勾配を表す微分演算子 ($= i\partial/\partial x + j\partial/\partial y + k\partial/\partial z$ (i, j, k は x, y, z 方向の単位ベクトル))

2-2-2 支配方程式

本節では以下の仮定を用いて多孔質材料内の微小容積について水分と熱の収支式をたてる [12]。

- 多孔質材料内部の水分は各相（気相、液相）間で常に平衡している（水分の局所平衡）。
- 多孔質材料内は均質（Homogeneous）であり、等方性（Isotropic）を有する。
- 変化過程における状態量は一価とし、履歴現象（Hysteresis）は考慮しない。

水蒸気と液水の収支式は次式で表される。

$$\frac{\partial(\Phi - y)r_g}{\partial t} = -\nabla J_g - W \quad (2.7)$$

$$\frac{\partial yr_1}{\partial t} = -\nabla J_1 + W \quad (2.8)$$

(2.7)式と(2.8)式より水分収支式は次式のようになる。

$$\frac{\partial(\Phi - y)r_g}{\partial t} + \frac{\partial yr_1}{\partial t} = -\nabla J_g - \nabla J_1 \quad (2.9)$$

熱については、同様にエンタルピーを用いて収支式を表すと、

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left((1 - \Phi)r_s H_s + (\Phi - y)r_a H_a + (\Phi - y)r_g H_g + yr_1 H_1 \right) \\ = -\nabla q - \nabla J_a H_a - \nabla J_g H_g - \nabla J_1 H_1 \end{aligned} \quad (2.10)$$

(2.10)式の両辺を展開する。左辺は、

$$\begin{aligned} &= (1 - \Phi)r_s \frac{\partial H_s}{\partial t} + (\Phi - y)r_a \frac{\partial H_a}{\partial t} + H_a \frac{\partial(\Phi - y)r_a}{\partial t} \\ &\quad + (\Phi - y)r_g \frac{\partial H_g}{\partial t} + H_g \frac{\partial(\Phi - y)r_g}{\partial t} + yr_1 \frac{\partial H_1}{\partial t} + H_1 \frac{\partial yr_1}{\partial t} \\ \therefore H_s \frac{\partial(1 - \Phi)r_s}{\partial t} &= 0 \end{aligned}$$

(2.10)式の右辺は、

$$= -\nabla q - J_a \nabla H_a - H_a \nabla J_a - J_g \nabla H_g - H_g \nabla J_g - J_1 \nabla H_1 - H_1 \nabla J_1$$

(2.11)式に示す乾燥空気の収支式と前述の水蒸気および液水の収支式にエンタルピーをそれぞれ乗じる。

$$\frac{\partial(\Phi - y)r_a}{\partial t} = -\nabla J_a \quad (2.11)$$

$$H_a \frac{\partial(\Phi - y)r_a}{\partial t} = -H_a \nabla J_a \quad (2.12)$$

$$H_g \frac{\partial(\Phi - y)r_g}{\partial t} = -H_g \nabla J_g - H_g W \quad (2.13)$$

$$H_1 \frac{\partial y r_1}{\partial t} = -H_1 \nabla J + H_1 W \quad (2.14)$$

固体実質部は変形せず、気相内の水蒸気および乾燥空気は完全ガスで、液水の比熱がその含水率に依存しないとすると、エンタルピーの変化量は定圧比熱を用いて次式で表せる。

$$dH_j = c_j dT \quad (j = s, a, g, \mathbf{1}) \quad (2.15)$$

また、エンタルピーの差 $H_g - H_1$ は、水蒸気から液水に相変化する際の発熱量であり、相変化熱（蒸発潜熱、吸着熱）を用いて次式で表せられる。

$$r = H_g - H_1 \quad (2.16)$$

(2.10)式の展開式に(2.11)～(2.16)式を代入する。

$$c_r \frac{\partial T}{\partial t} + c_a J_a \nabla T + c_g J_g \nabla T + c_1 J_1 \nabla T = -\nabla q + rW \quad (2.17)$$

ただし、

$$c\mathbf{r} = (1 - \Phi)c_s r_s + (\Phi - y)(c_a r_a + c_g r_g) + c_l r_l \mathbf{y} \quad (2.18)$$

ここで、

c : 定圧比熱 [J/kgK]、 J : 水分流 [kg/m²s]、 H : エンタルピー [J/kg]、 q : 熱流 [W/m²]、 r : 相変化熱 (気相から液相) [J/kg]、 T : 温度 [K]、 t : 時間 [s]、 W : 水蒸気から液水に相変化する水分量 [kg/m³s]、 ρ : 密度 [kg/m³]、 y : 体積含水率 [m³/m³]、 Φ : 空隙率 [-]

添え字)

a : 乾燥空気、 g : 水蒸気、 l : 液水、 s : 個体実質部

2-2-3 本論で用いる基礎方程式

水分収支式(2.9)式と熱収支式(2.17)式に対して適当な近似を行い、最終的な基礎方程式を得る[12]。水分収支式(2.9)式および熱収支式(2.17)式において、一般的に以下の仮定が成立する。

- ① $\frac{\partial(\Phi - y)r_g}{\partial t}$ は $\frac{\partial y r_l}{\partial t}$ に比べて小さい。
- ② 含水率の温度依存性が小さいことから、 $y = F(m)$ という関数式における。
- ③ 液水移動による顕熱流 ($c_a J_a \nabla T + c_g J_g \nabla T + c_l J_l \nabla T$) は潜熱流 ($r \nabla J_g$) に比べて小さい。
- ④ $r \frac{\partial(\Phi - y)r_g}{\partial t}$ は $c r \frac{\partial T}{\partial t}$ に比べて小さい。

以上の仮定を適用し、内部圧力の変化は無視できるものとして(2.6)式を用い、(2.9)式および(2.17)式より以下の熱水分同時移動方程式を得る。

$$r_l \frac{\partial y}{\partial m} \cdot \frac{\partial m}{\partial t} = \nabla [I'_m (\nabla m - F_w)] + \nabla (I'_T \nabla T) \quad (2.19)$$

$$c\mathbf{r} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla[rI'_{mg} (\nabla m - F_w)] + \nabla[(I + rI'_{Tg}) \nabla T] \quad (2.20)$$

通常、水分 1kg に作用する外力 F_w は、重力 g による仕事量のみで一定であるが (g : 重力 [9.8m/s²]、 $F_w = 9.8$ [N/kg, J/mkg, m/s²])、この重力成分が毛管力に比べて非常に小さく無視できる場合は次式のようになる。

$$r_1 \frac{\partial y}{\partial m} \cdot \frac{\partial m}{\partial t} = \nabla(I'_m \nabla m) + \nabla(I'_T \nabla T) \quad (2.21)$$

$$c\mathbf{r} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(rI'_{mg} \nabla m) + \nabla[(I + rI'_{Tg}) \nabla T] \quad (2.22)$$

また、熱容量については、 $c_s \mathbf{r}_s \cong c_s \mathbf{r}_s (1 - \Phi) + (\Phi - y)(c_a \mathbf{r}_a + c_g \mathbf{r}_g)$ と見なせる。

$$c\mathbf{r} = c_s \mathbf{r}_s + c_1 \mathbf{r}_1 y \quad (2.23)$$

本論では、材料内の熱水分移動の基礎方程式として、(2.19)式～(2.23)式を用いる。これらの基礎方程式を適当な境界条件の下で解く。

ここで、

c : 定圧比熱 [J/kgK]、 $c\mathbf{r}$: 熱容量 [J/m³K] ((2.18)式で定義)、 $F(\)$: 関数を表す、 F_w : 水分 1kg に作用する外力 [N/kg, J/mkg, m/s²]、 g : 重力加速度 [9.8m/s²]、 J : 水分流 [kg/m²s]、 r : 相変化熱 [J/kg]、 T : 温度 [K]、 t : 時間 [s]、 I : 熱伝導率 [W/mK]、 I'_T : 温度勾配に関する水分伝導率 [kg/msK]、 I'_{Tg} : 温度勾配に関する気相水分伝導率 [kg/msK]、 I'_m : 水分化学ポテンシャル勾配に関する水分伝導率 [kg/ms(J/kg)]、 I'_{mg} : 水分化学ポテンシャル勾配に関する気相水分伝導率 [kg/ms(J/kg)]、 m : 水分化学ポテンシャル [J/kg]、 \mathbf{r} : 密度 [kg/m³]、 y : 体積含水率 [m³/m³]、 Φ : 空隙率 [-]

添え字)

a : 乾燥空気、 g : 水蒸気、 \mathbf{l} : 液水、 s : 個体実質部

2-2-4 境界条件 [48]

空気に接する材料表面では対流による熱伝達層と相似な水分伝達層が生じる。材料表面の温度を T_f 、空気の温度を T_{out} とすると、空気から材料表面に伝わる対流熱伝達による熱流は(2.24)式で表される。

$$q_c = a_c(T_{out} - T_f) \quad (2.24)$$

同様に、材料表面の水蒸気圧を p_{v_f} 、空気の水蒸気圧を $p_{v_{out}}$ とすると、空気から材料表面に伝わる水分流は(2.25)式で表される。

$$J = a'(p_{v_{out}} - p_{v_f}) \quad (2.25)$$

熱と水分の拡散の相似性より、以下の関係式が成立する。

$$\frac{a_c}{a'_m r_m R_v T} = Le \quad (2.26)$$

通常、ルイス数 Le は 1.0 と近似されることが多い。これをルイス則という。

(2.25)式を温度と水分化学ポテンシャルを用いて表現すると以下のようなになる。ここで、 m_{out} は空気的水分化学ポテンシャル、 m_f は材料表面的水分化学ポテンシャルである。

$$J = a'_m(m_{out} - m_f) + a'_T(T_{out} - T_f) \quad (2.27)$$

(2.25)式と(2.27)式との関係から、

$$a'_m = a' \frac{\partial p_v}{\partial m}, \quad a'_T = a' \frac{\partial p_v}{\partial T} \quad (2.28)$$

相対湿度と水蒸気圧および飽和水蒸気圧との関係 ($Rh = p_v / p_{vs}$) と、水分化学ポテンシャルの定義式 ($m = R_v T \ln(Rh)$) を(2.28)式に用いると、

$$a'_m = a' \frac{p_v S}{R_v T} Rh \quad (2.29)$$

$$\mathbf{a}'_T = \mathbf{a}'_m \left(\frac{R_v T}{p_{v,s}} \cdot \frac{\partial p_{v,s}}{\partial T} - \frac{m}{T} \right) \quad (2.30)$$

このように、 \mathbf{a}'_m および \mathbf{a}'_T は水分化学ポテンシャルの定義式より値が求められるが、温度と水分化学ポテンシャルの関数であり、常数として用いることはできない。また、一般的な湿気伝達率 \mathbf{a}' との混乱を避けるために、通常は水分伝達率と呼び区別される。

熱伝達には前述の対流熱伝達の他に材料表面と周囲の固体表面とが熱交換を直接的に行う輻射熱伝達がある。輻射熱伝達量は周囲のすべての固体表面が関係するので、対流熱伝達のように局所的な位置で表現することができない。しかし、建築で取り扱う場合では各固体間における表面温度差が小さく、かつ、空気温度に近いことが多い。したがって、対象表面温度を空気温度と見なして線形化し、対流熱伝達と同様に表現する。

$$q_r = \mathbf{a}_r (T_{out} - T_f) \quad (2.31)$$

材料表面では対流と輻射による熱伝達で熱流が生じている。よって、(2.24)式と(2.31)式より、

$$q = q_c + q_r = \mathbf{a}_c (T_{out} - T_f) + \mathbf{a}_r (T_{out} - T_f) = (\mathbf{a}_c + \mathbf{a}_r) (T_{out} - T_f) = \mathbf{a} (T_{out} - T_f) \quad (2.32)$$

以上から、空気と接する固体表面での境界条件（いわゆる第3種境界条件）式は、熱移動および水分移動、それぞれの収支式とあわせて以下のようになる。

$$\mathbf{a}'_m (m_{out} - m_f) + \mathbf{a}'_T (T_{out} - T_f) = -l'_m \left(\frac{\partial m}{\partial n} \Big|_f - nF_w \right) - l'_T \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_f \quad (2.33)$$

$$\text{または、} \mathbf{a}'(p_{v,out} - p_{v,f}) = -l'_m \left(\frac{\partial m}{\partial n} \Big|_f - nF_w \right) - l'_T \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_f \quad (2.34)$$

$$(\mathbf{a} + r\mathbf{a}'_T)(T_{out} - T_f) + r\mathbf{a}'_m (m_{out} - m_f) = -(l + r l'_T) \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_f - r l'_m \left(\frac{\partial m}{\partial n} \Big|_f - nF_w \right) \quad (2.35)$$

$$\text{または、} \mathbf{a}(T_{out} - T_f) + r\mathbf{a}'(p_{v,out} - p_{v,f}) = -(l + r l'_T) \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_f - r l'_m \left(\frac{\partial m}{\partial n} \Big|_f - nF_w \right) \quad (2.36)$$

ここで、

c_m : 湿り空気の定圧比熱 [J/kgK]、 F_w : 水分 1kg に作用する外力 [N/kg、J/mkg、m/s²]、 J : 水分流 [kg/m²s]、 Le ($= (a/D)^{1-n}, n \cong 1/3$) : ルイス数 [-] (a : 湿り空気の温度伝導率 [m²/s]、 D : 湿り空気中の水蒸気の拡散係数 [m²/s])、 n : 固体表面の内向き法線ベクトルを表す、 p_v : 水蒸気圧 [Pa]、 p_{vs} : 飽和水蒸気圧 [Pa]、 q : 熱流 [W/m²]、 q_c : 対流熱伝達による熱流 [W/m²]、 q_r : 輻射熱伝達による熱流 [W/m²]、 Rh : 相対湿度 [-]、 R_v ($= R/m_v$) : 水蒸気の理想気体定数 [461.643Pam³/kgK] (R : 空気の気体定数 [8316.96Pam³/kmolK]、 m_v : 水蒸気の分子量 [18.016kg/kmol])、 r : 相変化熱 [J/kg]、 T : 温度 [K]、 a : 総合熱伝達率 [W/m²K]、 a_c : 対流熱伝達率 [W/m²K]、 a_r : 輻射熱伝達率 [W/m²K]、 a' : 湿気伝達率 [kg/m²sPa]、 a'_T : 温度勾配に関する水分伝達率[kg/m²sK]、 a'_m : 水分化学ポテンシャル勾配に関する水分伝達率[kg/m²s(J/kg)]、 I : 熱伝導率 [W/mK]、 I'_T : 温度勾配に関する水分伝導率 [kg/msK]、 I'_{Tg} : 温度勾配に関する気相水分伝導率 [kg/msK]、 I'_m : 水分化学ポテンシャル勾配に関する水分伝導率 [kg/ms(J/kg)]、 I'_{mg} : 水分化学ポテンシャル勾配に関する気相水分伝導率 [kg/ms(J/kg)]、 m : 水分化学ポテンシャル [J/kg]、 r_m : 湿り空気の密度 [kg/m³]

添え字)

out : 外気、 f : 材料表面

2-2-5 数値計算方法

前述の基礎方程式は非線形であり、解析解を求めることが困難なため、差分化を行って数値的に解を求める。

水分および熱収支式 ((2.21)式および(2.22)式) を 1次元の系で表すと次式となる。

$$r_1 \frac{\partial y}{\partial m} \cdot \frac{\partial m}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(I'_m \frac{\partial m}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(I'_T \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (2.37)$$

$$c r \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(r I'_{mg} \frac{\partial m}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left[(I + r I'_{Tg}) \frac{\partial T}{\partial x} \right] \quad (2.38)$$

前進有限差分法を用いて表現すると、水分収支式は、

$$r_1 \left(\frac{\partial y}{\partial m} \right)_i^k \cdot \frac{m_i^{k+1} - m_i^k}{\Delta t} \cdot \frac{\Delta x_{i-1} + \Delta x_i}{2} = J_{i-1}^k - J_i^k \quad (2.39)$$

ただし、

$$J_{i-1}^k = l'_{m_{i-1}} \frac{m_{i-1}^k - m_i^k}{\Delta x_{i-1}} + l'_{T_{i-1}} \frac{T_{i-1}^k - T_i^k}{\Delta x_{i-1}}, \quad J_i^k = l'_{m_i} \frac{m_i^k - m_{i+1}^k}{\Delta x_i} + l'_{T_i} \frac{T_i^k - T_{i+1}^k}{\Delta x_i} \quad (2.40)$$

同様に熱収支式は、

$$c r_i^k \cdot \frac{T_i^{k+1} - T_i^k}{\Delta t} \cdot \frac{\Delta x_{i-1} + \Delta x_i}{2} = q_{i-1}^k - q_i^k \quad (2.41)$$

ただし、

$$q_{i-1}^k = r_{i-1}^k l'_{m_{g_{i-1}}} \frac{m_{i-1}^k - m_i^k}{\Delta x_{i-1}} + (l_{i-1}^k + r_{i-1}^k l'_{T_{g_{i-1}}}) \frac{T_{i-1}^k - T_i^k}{\Delta x_{i-1}},$$

$$q_i^k = r_i^k l'_{m_{g_i}} \frac{m_i^k - m_{i+1}^k}{\Delta x_i} + (l_i^k + r_i^k l'_{T_{g_i}}) \frac{T_i^k - T_{i+1}^k}{\Delta x_i} \quad (2.42)$$

ここで、右側の下付き添え字の i は位置の座標番号を表し、上付き添え字の k は時間ステップ番号を表す。また、物性値 (l'_m 、 l'_T 、 l'_{m_g} 、 l'_{T_g} 、 l 、 r) は図 2.1 に示すように座標点の中間点 ($i-1/2$ 、 $i+1/2$) の温度や含水率によって定まる。それらの値には下式に示す調和平均を用いた [49]。

$$T_{i-1/2}^k = \frac{2T_{i-1}^k \cdot T_i^k}{T_{i-1}^k + T_i^k} \quad (2.43)$$

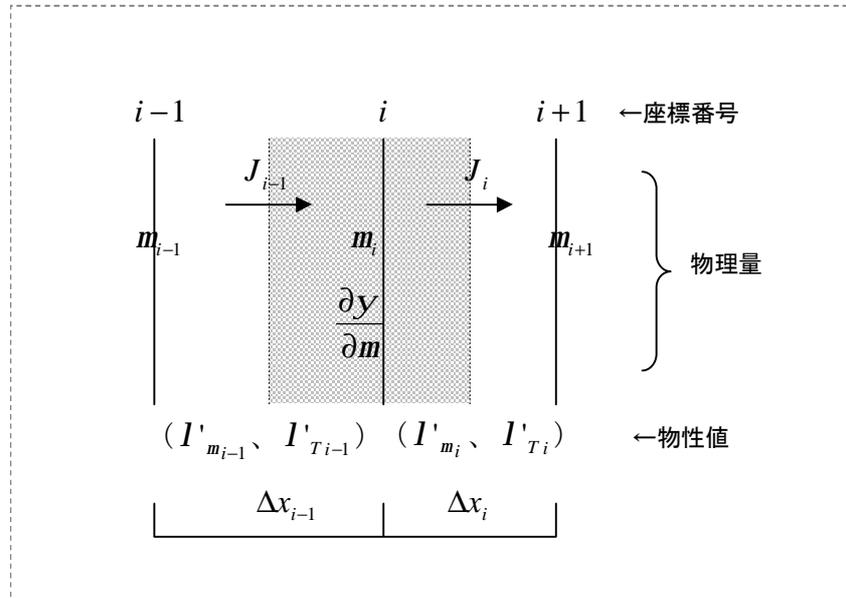


図 2.1 1次元の差分式で用いる座標の概要

ここで、

cr : 熱容量 $[\text{J}/\text{m}^3\text{K}]$ ((2.18)式で定義)、 i : 位置の座標番号、 J : 水分流 $[\text{kg}/\text{m}^2\text{s}]$ 、 k : 時間ステップ番号、 q : 熱流 $[\text{W}/\text{m}^2]$ 、 r : 相変化熱 $[\text{J}/\text{kg}]$ 、 T : 温度 $[\text{K}]$ 、 t : 時間 $[\text{s}]$ 、 x : 位置 $[\text{m}]$ 、 I : 熱伝導率 $[\text{W}/\text{mK}]$ 、 I'_T : 温度勾配に関する水分伝導率 $[\text{kg}/\text{msK}]$ 、 I'_{Tg} : 温度勾配に関する気相水分伝導率 $[\text{kg}/\text{msK}]$ 、 I'_m : 水分化学ポテンシャル勾配に関する水分伝導率 $[\text{kg}/\text{ms}(\text{J}/\text{kg})]$ 、 I'_{mg} : 水分化学ポテンシャル勾配に関する気相水分伝導率 $[\text{kg}/\text{ms}(\text{J}/\text{kg})]$ 、 m : 水分化学ポテンシャル (化学ポテンシャル) $[\text{J}/\text{kg}]$ 、 r_1 : 水の密度 $[\text{kg}/\text{m}^3]$ 、 y : 体積含水率 $[\text{m}^3/\text{m}^3]$ 、 Δx と Δt : 差分における位置刻みと時間刻み

2-3 本章のまとめ

本章では、多孔質材料内の熱水分同時移動の基礎方程式を示した。

基礎となる拡散方程式は、熱と水分の移動の駆動力として温度と自由水基準の化学ポテンシャルを用い、水分の局所平衡の仮定を基に表現されたもので、松本によって定式化されている。

松本の理論にしたがって、熱と水分の収支式から基礎方程式の導出までの過程を説明した。さらに、基礎方程式の解法の概略を示した。

【本章に関連する発表論文】

- [1.3] Sadayuki Onmura, Mamoru Matsumoto and Shuichi Hokoi : Study on evaporative cooling effect of roof lawn garden, *Energy and Buildings* 33, pp.653-666, 2001
- [2.1] 恩村、松本、銚井：建築材料の水分拡散特性の測定に関する研究－木材の水分拡散係数の測定、日本建築学会大会学術講演梗概集（北陸）、D環境工学、pp.943～944、1987.8
- [2.6] 恩村、銚井、松下、小椋、小南、安井：「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（関東）、pp.337～338、2006.9
- [2.7] 安井、銚井、松下、恩村、小椋、小南：「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（関東）、pp.339～340、2006.9
- [2.8] 恩村、銚井、松下、小椋、小南、安井：「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6 解析に用いた値が結果に及ぼす影響」、日本建築学会大会学術講演梗概集（九州）、pp.361～362、2007.8
- [3.5] 恩村、銚井、松下、小椋、小南、安井：「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」、平成18年度日本建築学会近畿支部研究報告集、pp.333～336、2006.6
- [3.6] 安井、銚井、松下、恩村、小椋、小南：「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」、平成18年度日本建築学会近畿支部研究報告集、pp.337～340、2006.6
- [3.7] 恩村、銚井、松下、小椋、小南、安井：「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6 解析に用いた値が結果に及ぼす影響」、平成19年度日本建築学会近畿支部研究報告集、pp.161～164、2007.6

第3章 コンクリートの熱湿気物性の測定

3-1 はじめに

硬化したコンクリートは骨材（砕石等の粗骨材と砂等の細骨材）をセメントペーストで固めたものと言え、セメントペーストは $2 \times 10^{-9} \text{m} \sim 1 \times 10^{-5} \text{m}$ の大きさの毛細管空隙とそれを取りまくセメント粒子から構成されている。セメント粒子内にも $1 \sim 3 \times 10^{-9} \text{m}$ の大きさのゲル空隙が存在する。これらの空隙内は水で満たされており、ゲル空隙内の水は結合水と呼ばれ、ほとんど移動しないが、毛細管空隙内の水は自由水と呼ばれ、自由にセメントペースト内を移動する。粗骨材とセメントペーストとの界面には遷移帯と呼ばれる連続気泡があり、セメントペースト内にはコンクリートの打設の際に生成される気泡がある。これらの空隙の大きさは $1 \times 10^{-5} \text{m} \sim 1 \times 10^{-2} \text{m}$ である。このようにコンクリート内には多くの空隙があり、自由水および外界から流入する水分等はこれらの空隙を介して移動すると考えられる [50]。

一般に、コンクリートの水セメント比を小さくすると強度が増大すると言われている。コンクリートは、セメント粒子と水との反応で生成されるセメントゲルによってセメント粒子どうしが網状に繋ぎ合って硬化していく。その際にセメントゲルによって水隙が埋められていくが、水セメント比が小さい、すなわちセメント量が多いほど、後に毛細管空隙となるこの水隙は小さくなり、量も少なくなる。また、水セメント比が小さいほどブリージング水が少なく、遷移帯と呼ばれる強度に影響を与える骨材周囲の連続気泡や水密性を損なう水みちなどの欠陥が少なくなる [50]。

このようにコンクリートの強度は内部空隙と密接に関係していることから、強度の違いによってコンクリートの熱湿気物性が異なると考えられる。

近年、表 3.1 に示すように用途に応じて様々な強度のコンクリートが用いられていることを考慮すると、強度の違いと熱湿気物性との関係を明らかにすることは重要と言える。

また、コンクリートはマクロ的には均質に見えても内部空隙の分布性状は極めて不均一であることが電子顕微鏡などによって確認されている [51]。このコンクリートの不均一さのため、熱湿気物性の測定値にばらつきが生じると考えられるが、強度の異なるコンクリートについて、すべての熱湿気物性を網羅的に測定した研究は非常に限られており [41]、ましてや測定値のばらつきの程

度を明らかにしたものは皆無である。

一方、建築壁体内部における熱水分移動は第2章で示した熱水分同時移動方程式を用いて解析できるが、解析に必要な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を気相と液相の水分伝導率に分離して測定することは容易ではない。これらの水分伝導率は、通常、比較的簡単に測定できる湿気伝導率や透水係数を用いて、気液の共存や分離を考慮しながら推定される[12]、[52]。コンクリートについても同様の方法で気相および液相の水分伝導率を推定した例があるが、湿気伝導率や透水係数には異なる出典の文献値が用いられている[53]。

そこで、現在、一般的に用いられている強度の異なる3種類のコンクリート、Fc27、Fc33、Fc40 (Fcは設計基準強度を表す) について、水分伝導率の気液分離に必要とされる湿気伝導率、平衡含水率、透水係数および熱伝導率の測定を行った。本章では測定の概要と結果を述べるとともに、各熱湿気物性と強度・含水率・温度との関係、物性値のばらつきや度合いや傾向等を明らかにする。同時に、国内外の既往の文献値との比較も行う。

表 3.1 一般的に使用されているコンクリートの用途、強度、水セメント比

名称・用途	設計基準強度 [Fc, N/mm ²]	水セメント比 [%]	備考
通常のコンクリート 低・中層建物に用いられる	21~27	50~60	
中強度コンクリート 中・高層建物に用いられる	30~36	45~50	プレキャストコンクリートの強度もほぼこの程度である
高強度コンクリート 高層建物・超高層建物に用いられる	36~60 60~100	30~45 20~30	60N/mm ² 以上のコンクリートを使用する場合、国土交通省大臣の認定が必要である
超高強度コンクリート	100~200	15~20	実用例は少ない

3-2 試験体と試験片

測定に用いたコンクリートの使用材料を表 3.2 に、調合を表 3.3 に、品質試験（フレッシュ試験および圧縮強度試験）の結果を表 3.4 に示す（フレッシュ試験については写真 3.1 を参照）。

表 3.2 測定に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 3160 kg/m ³ ）
細骨材	海砂と砕砂（混合率 7:3、合成密度 2570 kg/m ³ ）
粗骨材	砕石（表乾密度 2670 kg/m ³ ）
混和剤	高性能 AE 減水剤、AE 助剤

表 3.3 測定に用いたコンクリートの調合

強度	水セメント比 [%]	粗骨材率 [%]	単位量 [kg/m ³]				
			セメント	水	細骨材	粗骨材	混和剤
Fc27	54.0	50.9	333	180	846	909	0.7
Fc33	47.0	50.2	394	185	827	864	0.7
Fc40	40.0	50.6	463	185	793	842	0.8

混和剤の量はセメント量に対する割合 [%]

粗骨材率は (100 - 細骨材率 [%])

細骨材率は全骨材に対して細骨材が占める体積比率

表 3.4 測定に用いたコンクリートの品質試験結果

	Fc27	Fc33	Fc40
*スランプ [cm]	18.3	20.0	23.5
*スランプフロー [cm]	30.6×29.8	34.7×31.6	43.2×41.6
*空気量 [%]	5.5	5.0	4.9
*温度 [°C]	21	21	21
4週圧縮強度 [N/mm ²]	38.6	42.0	47.8
ヤング係数 [N/mm ²]	2.91×10 ⁴	2.95×10 ⁴	3.04×10 ⁴

*はフレッシュ試験の結果

直径 7.5cm・長さ 30.0cm の円柱形コンクリート試験体を強度ごと (Fc27、Fc33、Fc40) に 3 体 (計 9 体)、直径 10.0cm・長さ 30.0cm の円柱形コンクリート試験体を強度ごとに 1 体 (計 3 体)、29.0 cm × 29.0 cm × 6.0cm の平板形コンクリート試験体を強度ごとに 7 体 (計 21 体) 作成した。

試験体は 2003 年 4 月 25 日に作成した。円柱形試験体は、コンクリート打設後、恒温・恒湿室内 (20℃・60%) で 4 週間放置 (気中養生) した後に脱型した。その後、同じ恒温・恒湿室の中にある水槽で 4 週間水中養生した後に、円柱形の試験片を次に示す要領で作成した。

Fc27 の直径 7.5cm の円柱形試験体のうちの 1 体を用いて、厚さ 1.0cm の湿気伝導率測定用の試験片を 12 個作成した。その内訳は、含水状況 [4 条件] × 3 個ずつの計 12 個である。直径 7.5cm の円柱形試験体の残りの 2 体を用いて、平衡含水率測定用の試験片を 24 個作成した。その内訳は、平衡させる相対湿度 [4 種類] × 吸湿と放湿 [2 条件] × 3 個ずつの計 24 個である。このとき、厚さの違いによる影響の有無を確認するために、1 体の試験体から厚さ 1.0cm の試験片を 8 個、厚さ 1.5cm の試験片を 4 個切り出した。なお、試験体の 1 体は吸湿条件に、残りの 1 体は放湿条件に用いている。また、Fc27 の直径 10.0cm の円柱形試験体を用いて、厚さ 1.0cm の透水係数測定用の試験片を 3 個作成した。他の強度についても同様にして同数の試験片を作成した。



写真 3.1 フレッシュ試験

平板形試験体は、コンクリートを打設した3日後に脱型し、恒温・恒湿室内（20℃・55%または60%）で約7ヶ月間放置（気中養生）した後、熱伝導率の測定に使用した。平板形試験体については加工を施していない。

試験体および試験片の概要を図3.1に示す。

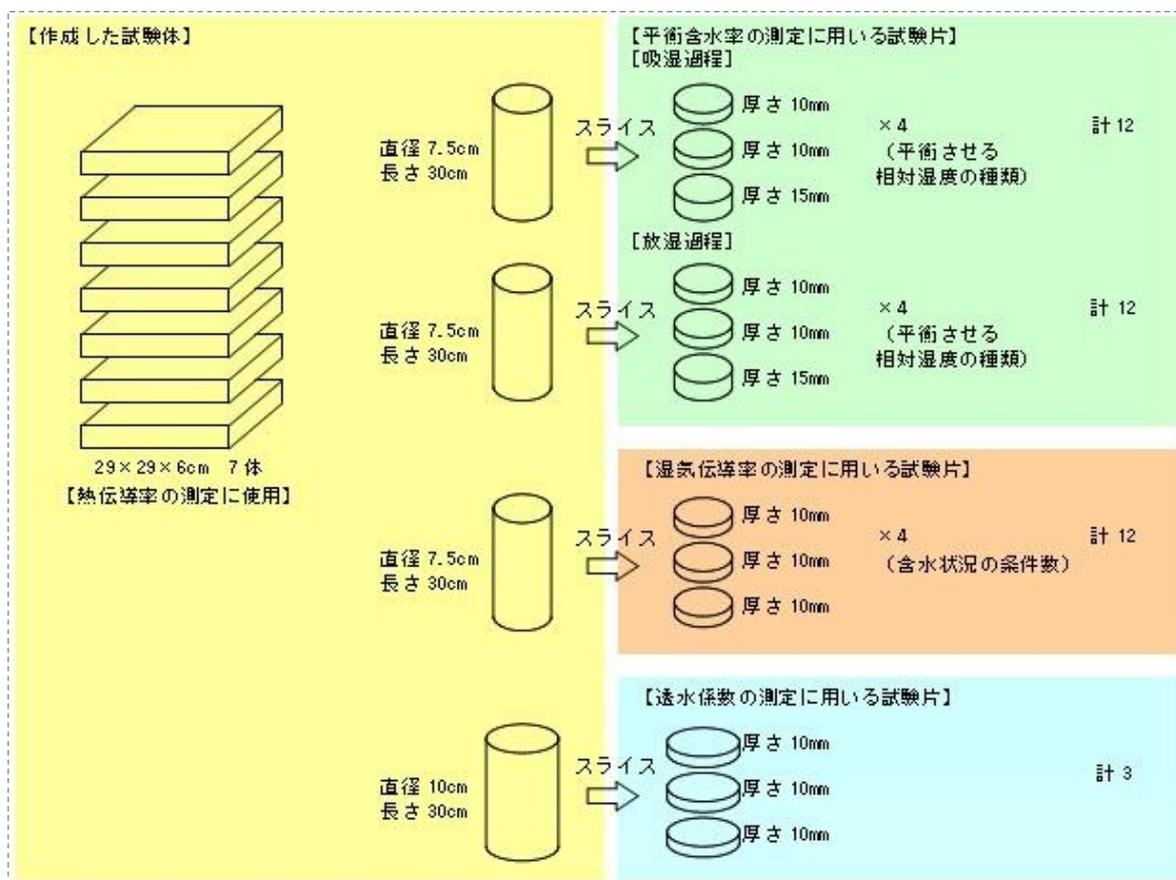


図 3.1 作成した試験体および試験片の概要（Fc27、Fc33、Fc40 共通）

3-3 湿気伝導率の測定

3-3-1 測定方法

湿気伝導率はカップ法 [54] に準じた方法によって測定を行った。図 3.2 に測定概要を示す。写真 3.2 に示すように、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、 $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 、NaCl、 KNO_3 の 4 種類、各飽和塩水溶液が平衡する相対湿度は、11%、33%、75%、94%である）が入ったビーカーに蓋をし、温度 20℃、相対湿度 55%に制御された恒温・恒湿槽内に設置して、これらの単位時間当たりの重量変化を定常になるまで測定した。次に、液水移動の影響を検討するために、恒温・恒湿槽内の空気温度のみを 30℃に変えて同様の測定を行った。このとき、各飽和塩水溶液が平衡する相対湿度は、11%、32%、75%、92%となる。続いて、高温時の湿気伝導率を得るために、ビーカー内の飽和塩水溶液を蒸留水に変え、恒温・恒湿槽内の設定も 20℃、83%に変えて測定を行った。なお、測定は各条件とも 3 個の試験片を用いて行った。

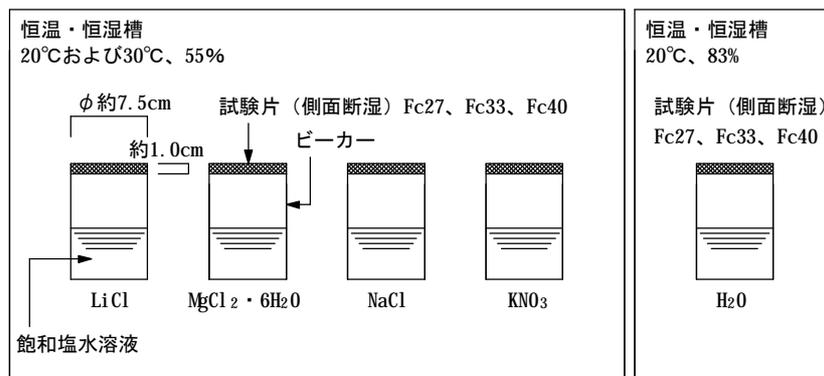


図 3.2 湿気伝導率測定の概要



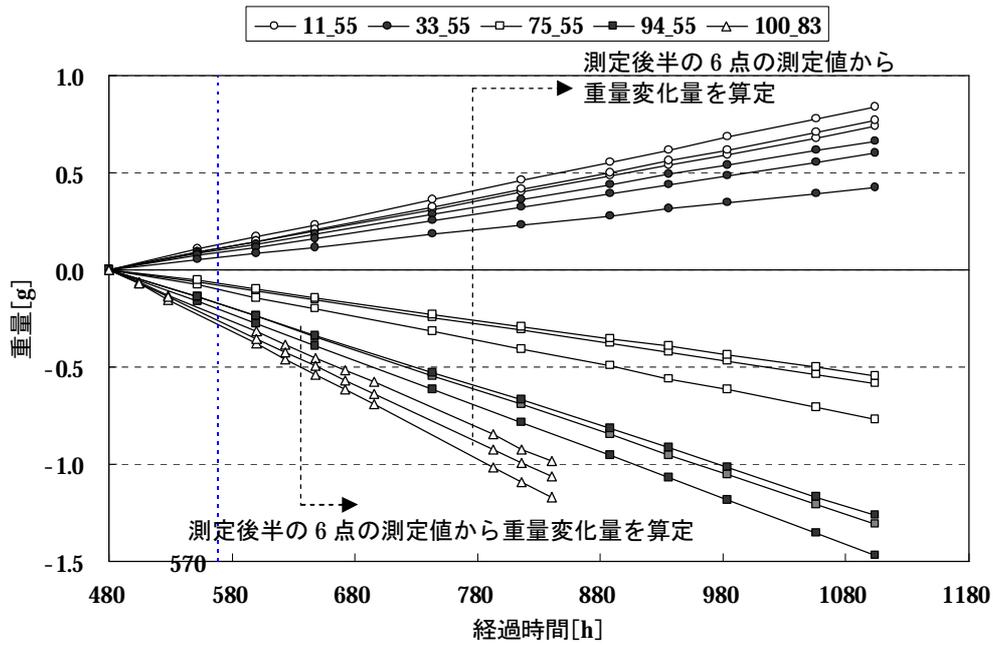
写真 3.2 湿気伝導率測定、試験片設置状況

3-3-2 重量変化の測定結果

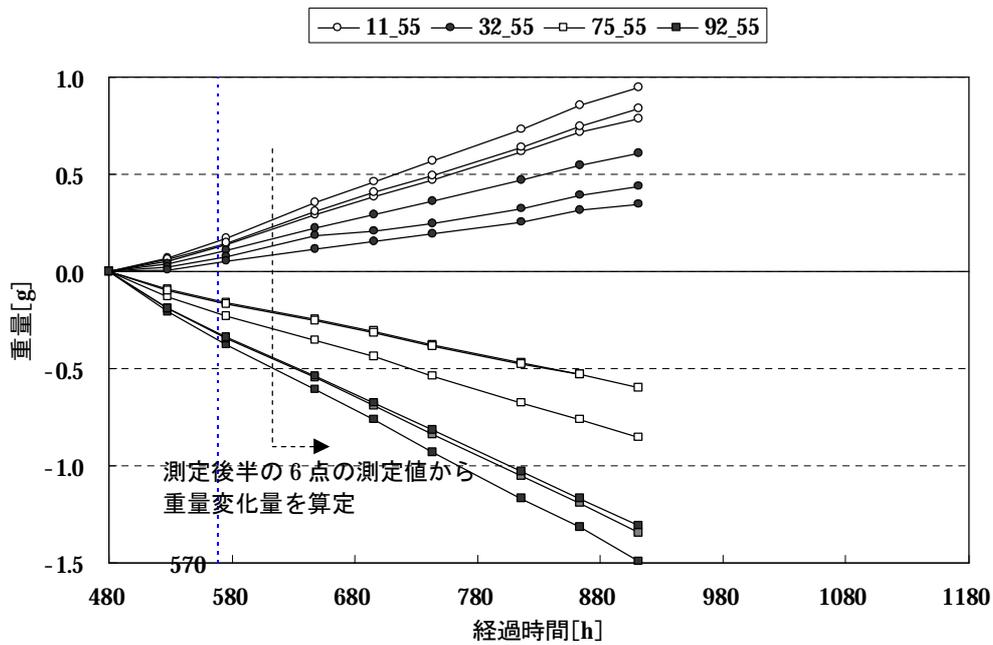
試験開始後 480 時間以降におけるビーカーの重量変化を図 3.3～図 3.5 に示す。

測定は、重量変化がほぼ定常に達するであろうと思われた試験開始 480 時間以降から行ったので、それ以前の値は記録していない。重量の増減は、試験開始 480 時間後の測定結果を基準 (=0) として図示している。

測定開始 570 時間以降の測定値を用いて求めた重量変化量と測定の後半 6 点の測定値（例えば図 3.3 において 20℃の 11_55 ならば、816 時間経過から 1104 時間経過までの 288 時間における測定値）を用いて求めた重量変化量の差が測定結果に及ぼす影響は最大で 5% 程度であったので、重量変化は測定開始 570 時間以降ではほぼ定常に達していたものと見なし、測定の後半 6 点の測定値から重量変化量を求めた。この重量変化量と試験片の面積を用いて定常水分流を求めた。



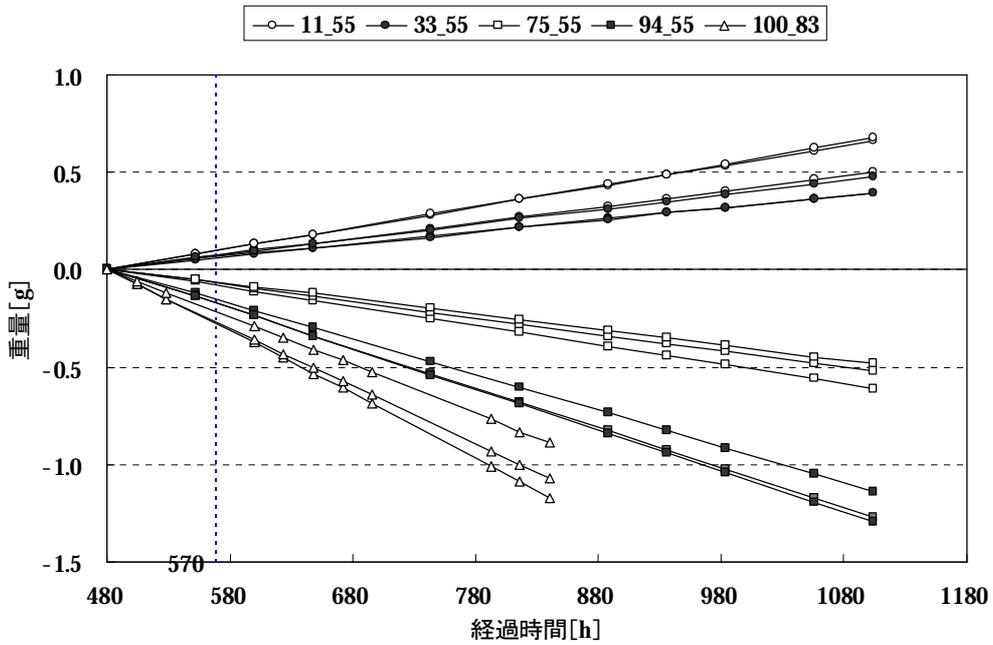
(a) 恒温・恒湿槽の温度 20°C



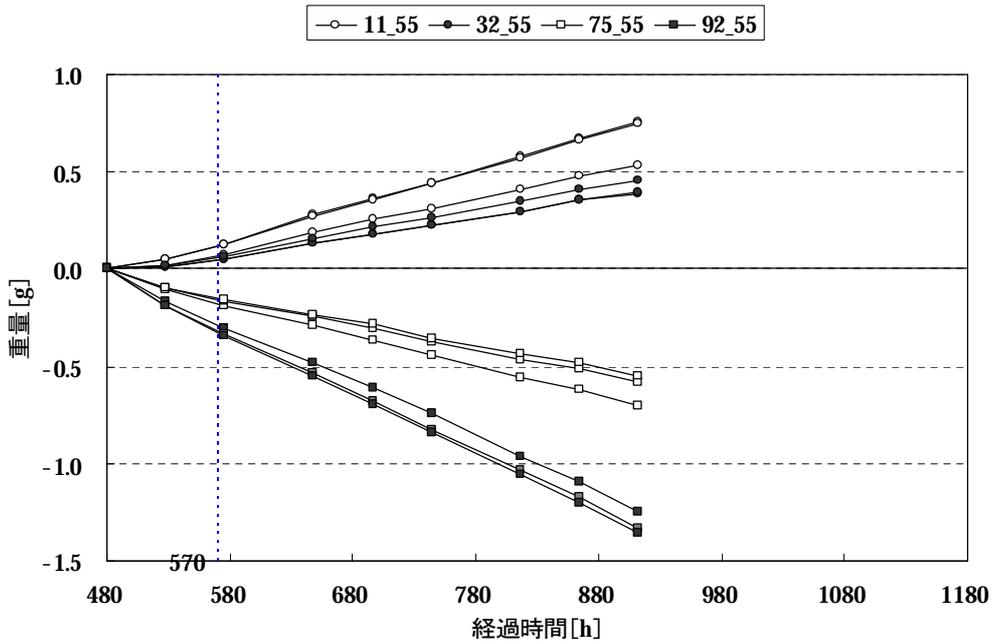
(b) 恒温・恒湿槽の温度 30°C

図 3.3 湿気伝導率測定における重量変化の測定結果 (Fc27)

※11_55 はビーカー内飽和塩水溶液 (または蒸留水) が平衡する相対湿度 11%、恒温・恒湿槽の相対湿度 55% を意味する。



(a) 恒温・恒湿槽の温度 20°C

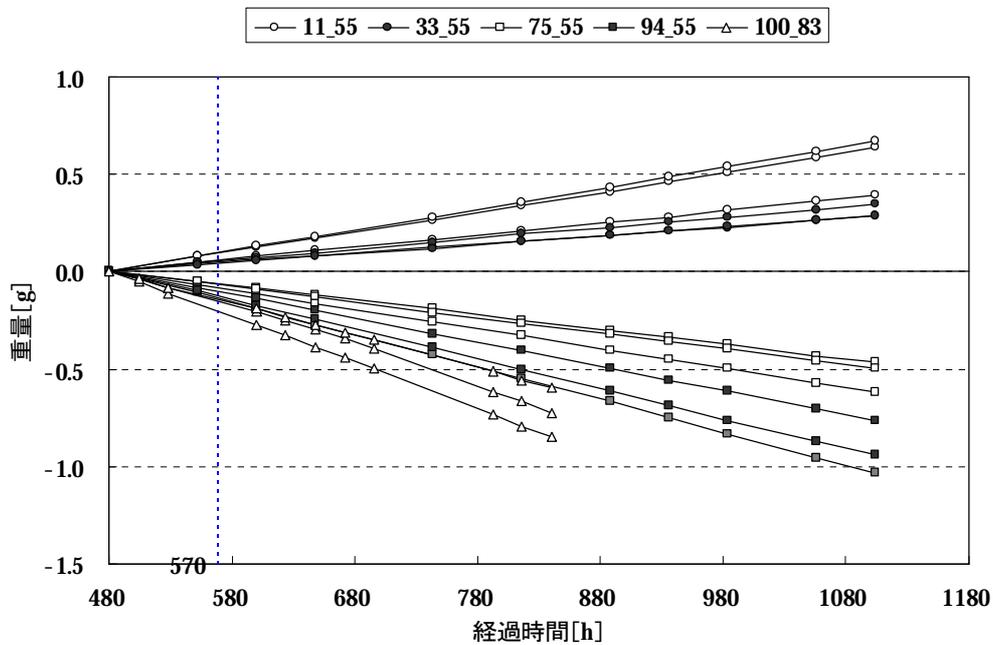


(b) 恒温・恒湿槽の温度 30°C

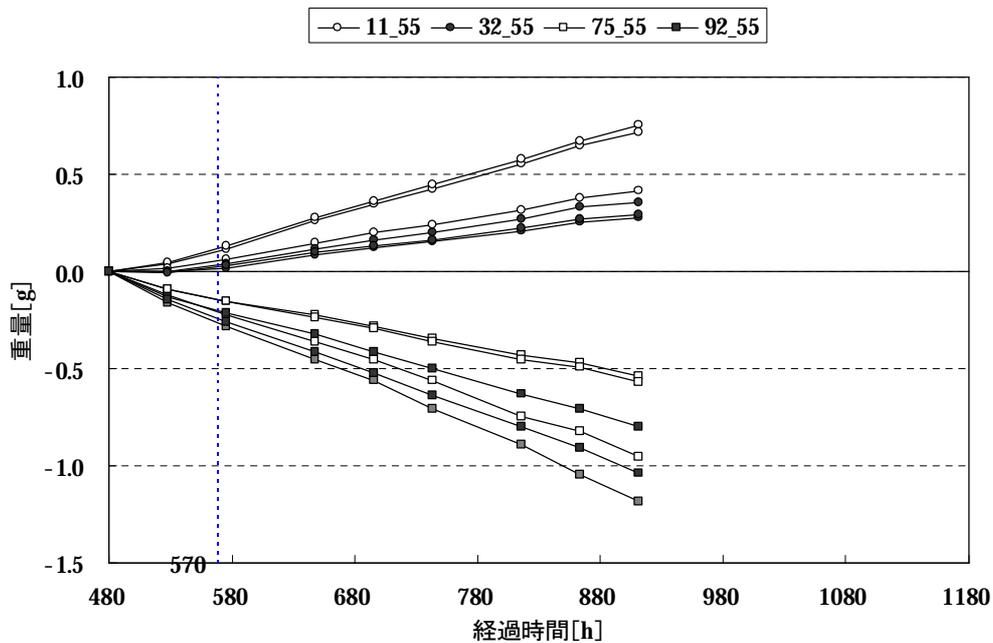
図 3.4 湿気伝導率測定における重量変化の測定結果 (Fc33)

※11_55 はビーカー内飽和塩水溶液 (または蒸留水) が平衡する相対湿度 11%、恒温・恒湿槽の相対湿度 55% を意味する。

※重量変化量の算定は図 3.3 と同じである。



(a) 恒温・恒湿槽の温度 20°C



(b) 恒温・恒湿槽の温度 30°C

図 3.5 湿気伝導率測定における重量変化の測定結果 (Fc40)

※11_55 はビーカー内飽和塩水溶液 (または蒸留水) が平衡する相対湿度 11%、恒温・恒湿槽の相対湿度 55% を意味する。

※重量変化量の算定は図 3.3 と同じである。

湿気伝導率は(3.1)式を用いて算定した(図3.6を参照)。なお、試験片上面での湿気伝達率およびビーカー内空気の湿気伝達抵抗は測定していないので、表3.5に示す文献値[55]を用いた。

$$k_v = \frac{Jd}{(p_{v_out} - p_{v_ssws}) - (J/a'_{out} + R'J)} \quad (3.1)$$

ここで、

d : 試験片の厚さ [m]、 J : 水分流 [kg/m²s]、 k_v : 湿気伝導率 [kg/msPa]、 p_v : 水蒸気圧 [Pa]、 R' : ビーカー内空気の湿気伝達抵抗 [m²sPa/kg]、 a' : 湿気伝達率 [kg/m²sPa]

添え字)

$_{out}$: ビーカー外空気、 $_{ssws}$: 飽和塩水溶液と平衡するという意

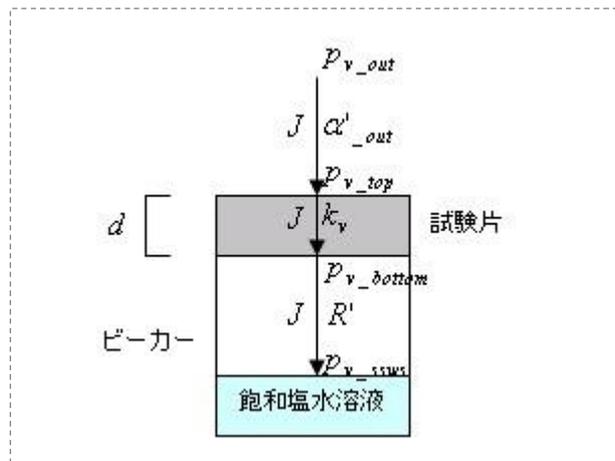


図 3.6 解析モデル

表 3.5 計算に用いた湿気伝達率と湿気伝達抵抗

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 ⁻⁸ kg/m ² sPa]
	下向き湿流	17.1kg/m ² h(kg/kg') [2.92×10 ⁻⁸ kg/m ² sPa]
気密空気層の 湿気伝達抵抗	上向き湿流 厚さ 144.8mm	0.241m ² h(kg/kg')/kg [1.41×10 ⁸ m ² sPa/kg]
	下向き湿流 厚さ 144.8mm	1.428m ² h(kg/kg')/kg [8.37×10 ⁸ m ² sPa/kg]

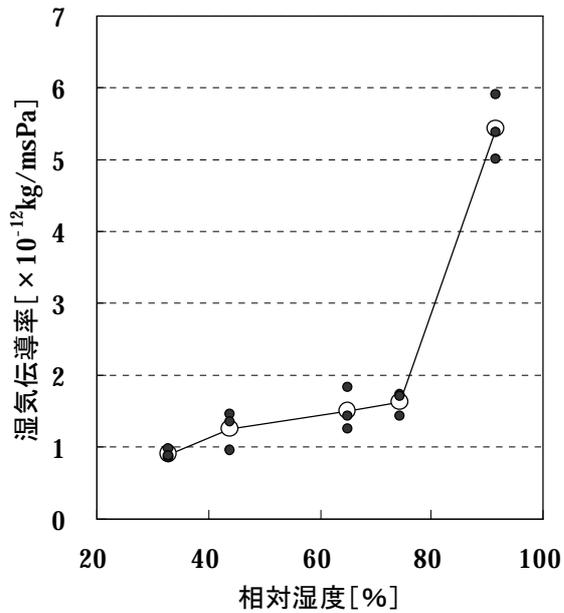
3-3-3 湿気伝導率の算定結果と考察

恒温・恒湿槽内の温度が 20℃の条件で得られた湿気伝導率を図 3.7 に、30℃の条件で得られた湿気伝導率を図 3.8 に示す。図 3.9 は両者を比較したものである。なお、湿気伝導率は恒温・恒湿槽内の相対湿度とビーカー内の飽和塩水溶液（または蒸留水）が平衡する相対湿度との平均に対応させてプロットしている。

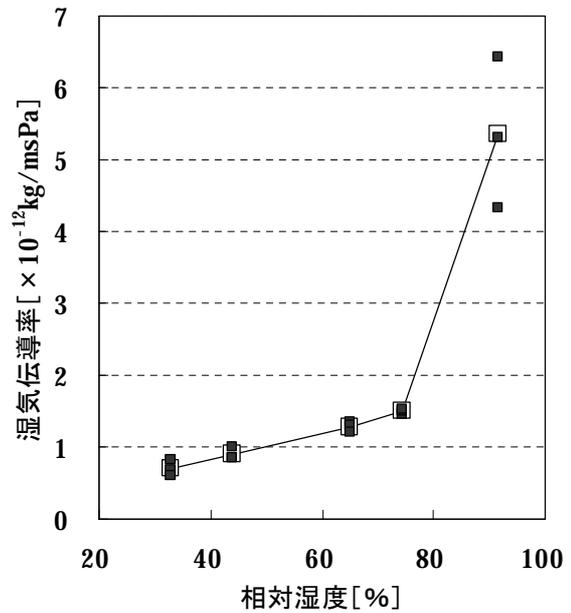
湿気伝導率は強度が高くなるほど小さくなる傾向がある。これは、強度が高いほどセメントペースト内でのセメント粒子間の距離が短くなり（すなわち、毛細管間隙が小さくなり）[50]、水分が材料内を移動しにくくなるためと考えられる。

Fc27 と Fc33 の測定結果との差を Fc33 と Fc40 の測定結果との差と比較した場合、高湿度域では後者の方が大きい。

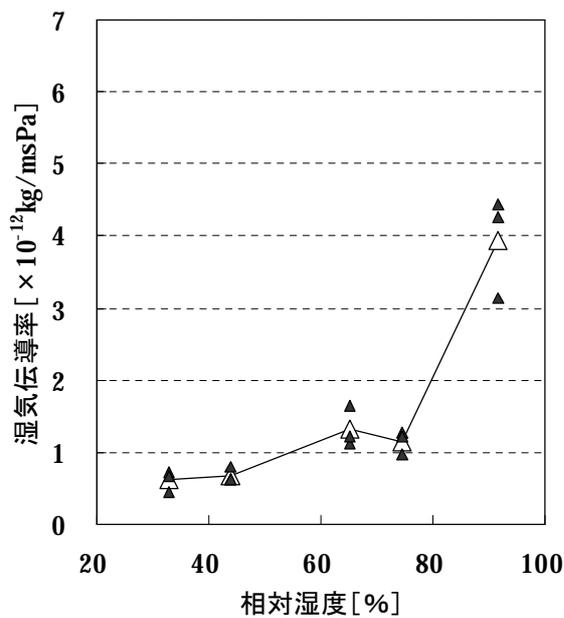
Fc40、ビーカー内飽和塩水溶液：NaCl の測定結果は、一つの試験片の結果が突出している。この原因として、特に水分が移動しやすい骨材分布であったこと、何らかの事情により水分の移動を増長させる欠陥が防湿部位または試験片自身に生じたこと等が原因として考えられるが、正確には特定できない。



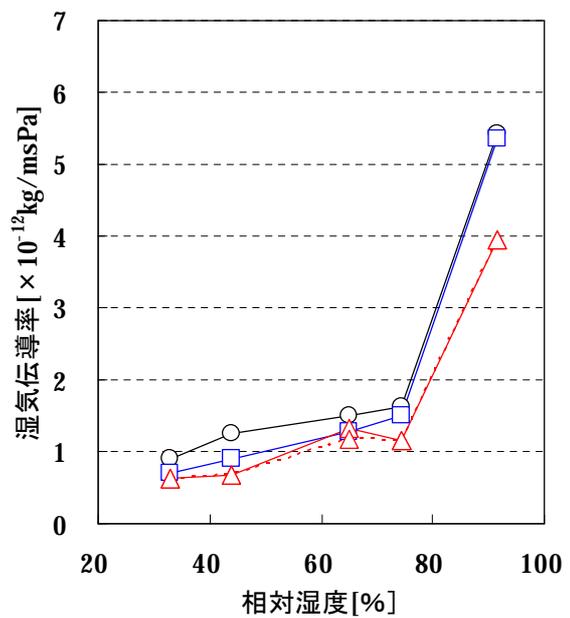
(a) Fc27



(b) Fc33



(c) Fc40

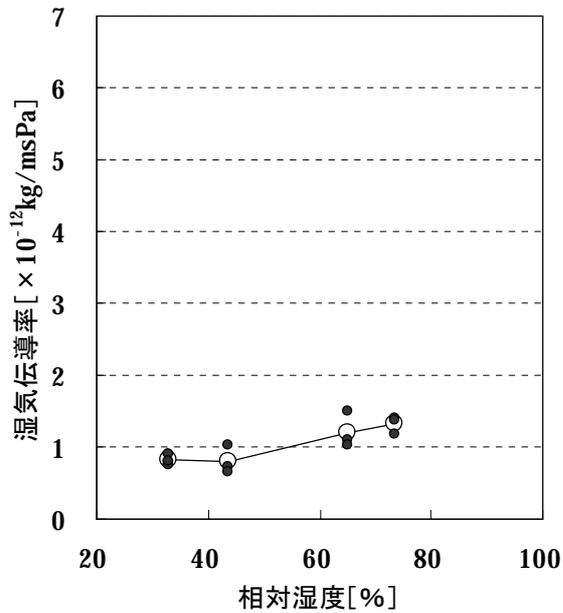


(d) 全強度の平均値

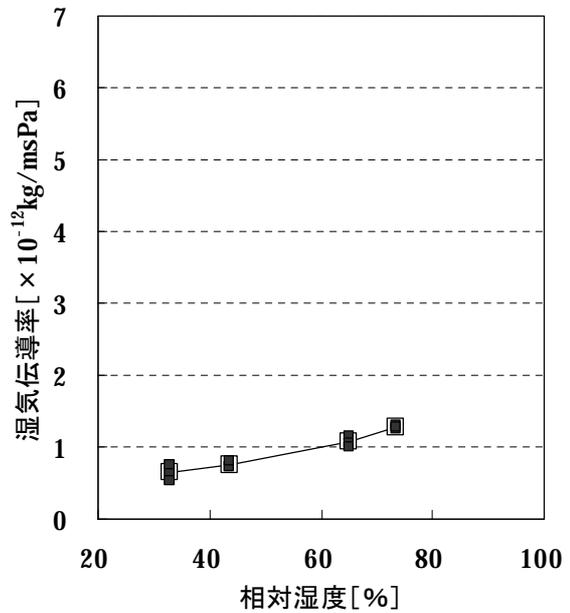
図 3.7 湿気伝導率の測定結果 (恒温・恒湿槽内温度 20°C)

※丸印は Fc27 を、四角形は Fc33 を、三角形は Fc40 を示す。

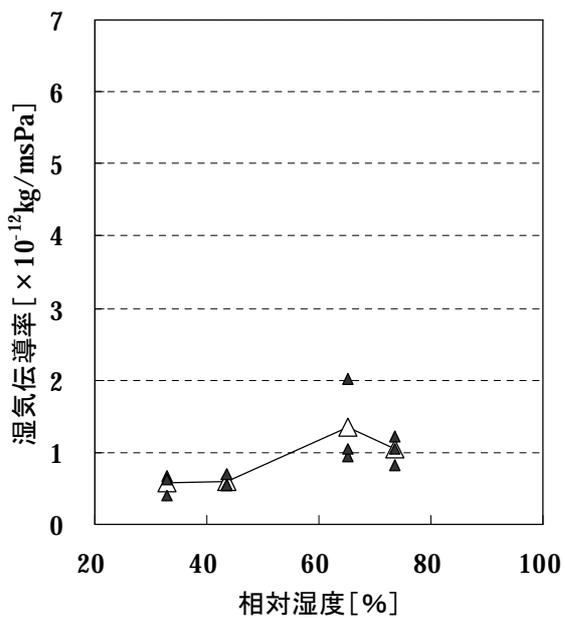
※各強度の大きな白色シンボルは平均値を、小さい黒色シンボルは測定値を示す。



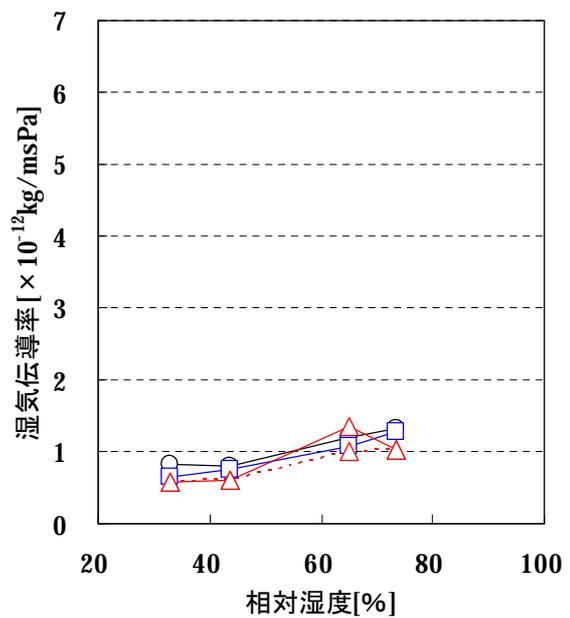
(a) Fc27



(b) Fc33



(c) Fc40

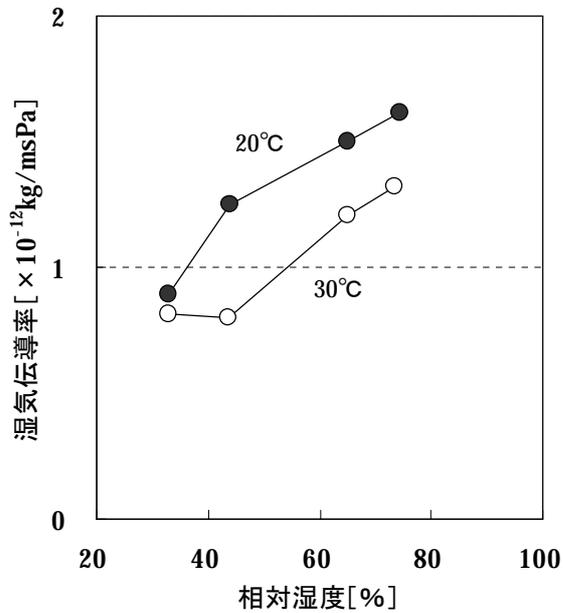


(d) 全強度の平均値

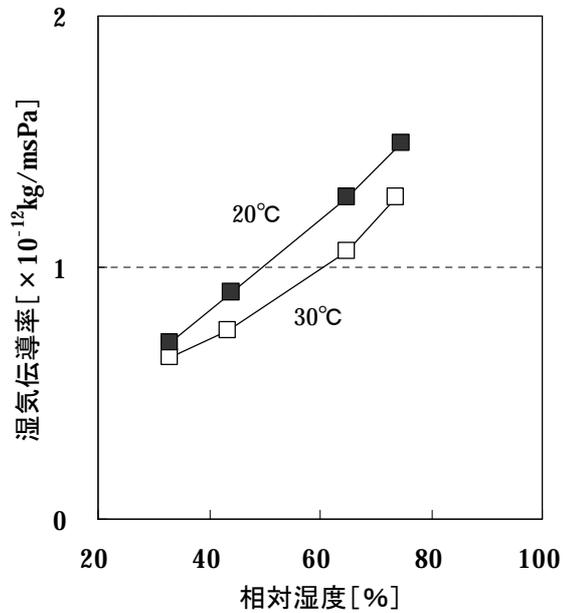
図 3.8 湿気伝導率の測定結果 (恒温・恒湿槽内温度 30°C)

※丸印は Fc27 を、四角形は Fc33 を、三角形は Fc40 を示す。

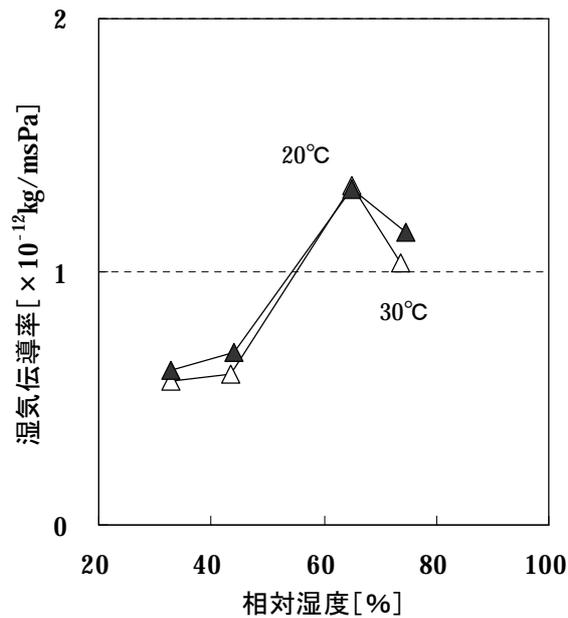
※各強度の大きな白色シンボルは平均値を、小さい黒色シンボルは測定値を示す。



(a) Fc27



(b) Fc33



(c) Fc40

図 3.9 湿気伝導率の測定結果 (恒温・恒湿槽内温度 20°Cと 30°Cとの比較)

※丸印は Fc27 を、四角形は Fc33 を、三角形は Fc40 を示す。

※各強度の白色シンボルは 30°Cの平均値を、黒色シンボルは 20°Cの平均値を示す。

一部の結果を除き、どの強度のコンクリートにおいても試験片内の相対湿度の増大にともない湿気伝導率が増加し、特に相対湿度が90%以上で急激に大きくなる傾向が得られた。また、恒温・恒温槽の温度を30°Cに高くした測定では、得られた湿気伝導率は20°Cの場合に比べて低下した。

この結果について考察する。

材料内の水分移動が気相水分（水蒸気）のみで生じるとすると、水分流は(3.2)式で表現できる[52]。

$$J = -I' \nabla p_v \quad (3.2)$$

(3.2)式の湿気伝導率 (I') は、液相水分移動の影響が含まれると考えられる湿気伝導率測定値とは異なり、気相水分のみの移動を表す理論上の湿気伝導率であり、温度が変わってもほとんど変化しない。

水蒸気圧は水分化学ポテンシャルと温度の関数として与えられ、それを $p_v = f(m, T)$ とすると、

$$\nabla p_v = \frac{\partial f}{\partial m} \nabla m + \frac{\partial f}{\partial T} \nabla T \quad (3.3)$$

よって、(3.2)式と(3.3)式より、

$$J = -I' \frac{\partial p_v}{\partial m} \nabla m - I' \frac{\partial p_v}{\partial T} \nabla T \quad (3.4)$$

一方、移動ポテンシャルに温度および水分化学ポテンシャルを用いて気相水分流を表現すると、

$$J = -I'_{m_g} \nabla m - I'_{T_g} \nabla T \quad (3.5)$$

よって、(3.4)式と(3.5)式の関係から、水分化学ポテンシャル勾配に関する気相水分伝導率 (I'_{m_g}) は、次式で表現できる。

$$I'_{m_g} = I' \frac{\partial p_v}{\partial m} \quad (3.6)$$

相対湿度と水蒸気圧および飽和水蒸気圧との関係 ($Rh = p_v / p_{vS}$) と、水分化学ポテンシャルの定義式 ($m = R_v T \ln(Rh)$) を用いると、

$$I'_{mg} = I' \frac{p_{vS}}{R_v T} Rh \quad (3.7)$$

よって、温度一定で一次元の場合、(3.5)式と(3.7)式の関係から、

$$J = -I' \frac{p_{vS}}{R_v T} Rh \frac{\partial m}{\partial x} \quad (3.8)$$

材料内を気相水分のみが移動する場合、定常時では材料内の水蒸気圧は一定の傾きで分布するので (I' : 一定)、

$$\frac{\partial m}{\partial x} = \{R_v T \ln(Rh_{top}) - R_v T \ln(Rh_{bottom})\} / d \quad (3.9)$$

$$Rh = \frac{Rh_{top} + Rh_{bottom}}{2} \quad (3.10)$$

よって、

$$J|_{T=293.16} = -I' p_{vS}|_{T=293.16} \frac{Rh_{top} + Rh_{bottom}}{2} \{\ln(Rh_{top}) - \ln(Rh_{bottom})\} / d \quad (3.11)$$

$$J|_{T=303.16} = -I' p_{vS}|_{T=303.16} \frac{Rh_{top} + Rh_{bottom}}{2} \{\ln(Rh_{top}) - \ln(Rh_{bottom})\} / d \quad (3.12)$$

すなわち、周辺雰囲気温度を 20°C から 30°C に変えると、ビーカー内の飽和塩水溶液と平衡する相対湿度も若干変化するが、その変化は小さいことから、水分流は飽和水蒸気圧の変化に比例して大きくなる ($J|_{T=303.16} / J|_{T=293.16} = p_{vS}|_{T=303.16} / p_{vS}|_{T=293.16} = 1.82$ 倍)。

一方、湿気伝導率の測定結果 (k_v) は下式で算定される。

$$k_v = \frac{Jd}{\Delta p_v} = \frac{Jd}{p_{v_top} - p_{v_bottom}} = \frac{Jd}{p_{vS}(Rh_{_top} - Rh_{_bottom})} \quad (3.13)$$

周辺雰囲気温度を 20°C から 30°C に変えると、水蒸気圧差は水分流と同じ割合で大きくなるので、結局、得られる湿気伝導率は変わらないはずである。このことは測定結果と一致しない。

水分移動が液相水分のみで生じるとした場合、水分流は(3.14)式で表現できる。

$$J = I'_m \frac{\partial m}{\partial x} \quad (3.14)$$

温度による粘性係数の変化は小さいとして無視すると、水分化学ポテンシャル勾配に関する液相水分伝導率 (I'_m) はほとんど変化しない。したがって、定常時には材料内の水蒸気圧は一定の傾きで分布するので、(3.9)式が成り立ち、

$$J|_{T=293.16} = -I'_m R_v T|_{T=293.16} \{ \ln(Rh_{_top}) - \ln(Rh_{_bottom}) \} / d \quad (3.15)$$

$$J|_{T=303.16} = -I'_m R_v T|_{T=303.16} \{ \ln(Rh_{_top}) - \ln(Rh_{_bottom}) \} / d \quad (3.16)$$

すなわち水分流は周辺雰囲気温度の変化 (303.16/293.16=1.03 倍) の割合で大きくなる。(3.13)式のように、この水分流を水蒸気圧差で除することで湿気伝導率を求めると、水蒸気圧差は 1.82 倍になるので、得られる湿気伝導率 (k_v) は小さくなり、これは測定結果と定性的には一致する。しかし、測定結果の水分流は図 3.10 に示すようにすべての測定で 1.03 倍よりもはるかに大きく増加しており (平均で 1.56 倍)、この水分流の増加は液相水分の移動のみでは説明できない。

したがって、試験片内では気相水分と液相水分の両方の移動が存在していたと結論される。この現象は影響の差こそあれ、今回測定を行った湿度域全体で生じている。よって、コンクリートでは比較的低温湿度であっても気相水分だけではなく液相水分の移動も生じていると考えられる。すなわち、従来の測定により得られた湿気伝導率は、気相水分 (水蒸気) のみならず液相水分の移動も加わったものを水蒸気の移動と見なしていると言える。

ここで、

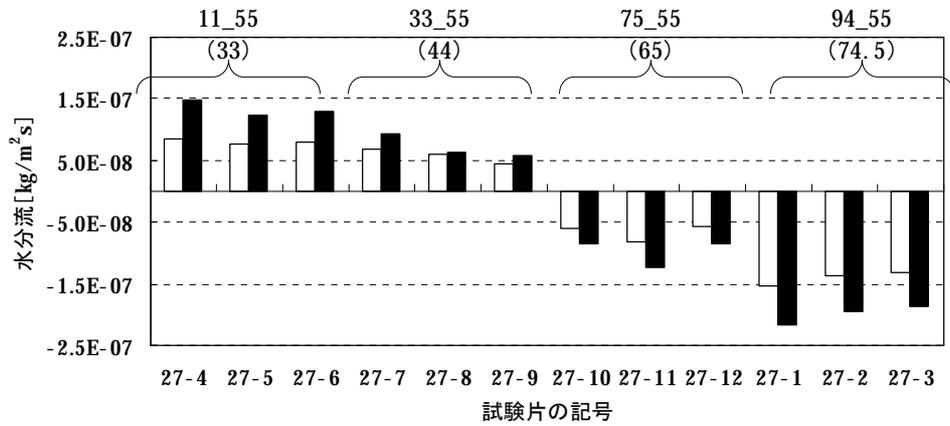
d : 試験片の厚さ [m]、 $f()$: 関数を表す、 J : 水分流 [kg/m²s]、 k_v : 測定された湿気伝導率 [kg/msPa]、 p_v : 水蒸気圧 [Pa]、 p_{vs} : 飽和水蒸気圧 [Pa]、 Rh : 相対湿度 [-]、 R_v : 水蒸気の気体定数 [461.643Pa³/kgK]、 T : 温度 [K]、 x : 位置 [m]、 I' : 気相水分の湿気伝導率 [kg/msPa]、 I'_{Tg} : 温度勾配に関する気相水分伝導率 [kg/msK]、 I'_{m_g} : 水分化学ポテンシャル勾配に関する気相水分伝導率 [kg/ms(J/kg)]、 I'_{m_l} : 水分化学ポテンシャル勾配に関する液相水分伝導率 [kg/ms(J/kg)]、 m : 水分化学ポテンシャル [J/kg]、 Δp_v : 水蒸気圧差 [Pa]、 ∇ : 空間勾配を表す微分演算子

添え字)

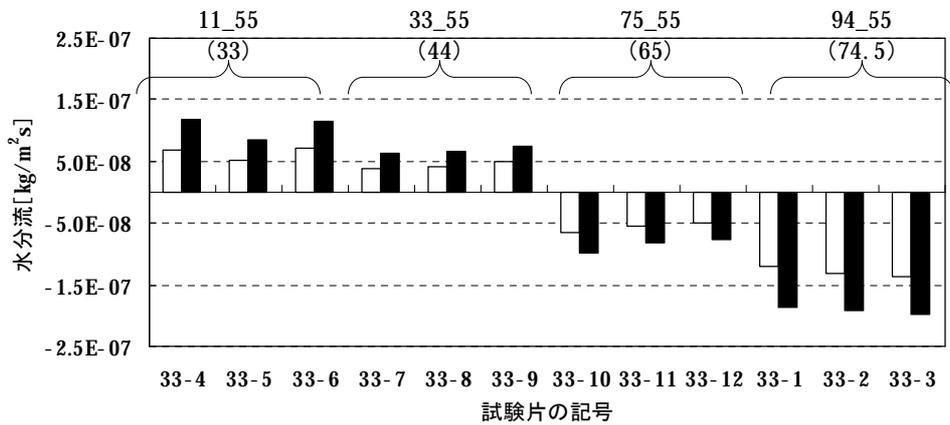
$_{top}$: 試験片上面、 $_{bottom}$: 試験片下面

測定値の平均を基準とすると、測定結果は Fc27 で 0.76~1.28 倍の範囲、Fc33 で 0.81~1.20 倍の範囲、Fc40 で 0.70~1.51 倍の範囲にある。平均値との差の最大は、どの強度でも蒸留水を用いた測定における結果において見られ、Fc27 が 4.69×10^{-13} kg/msPa、Fc33 が 1.08×10^{-12} kg/msPa、Fc40 が 8.10×10^{-13} kg/msPa である。前述の突出した試験片の結果を除いた場合を破線で表示して図 3.11 に示す。Fc40 は 0.72~1.19 倍の範囲となる。

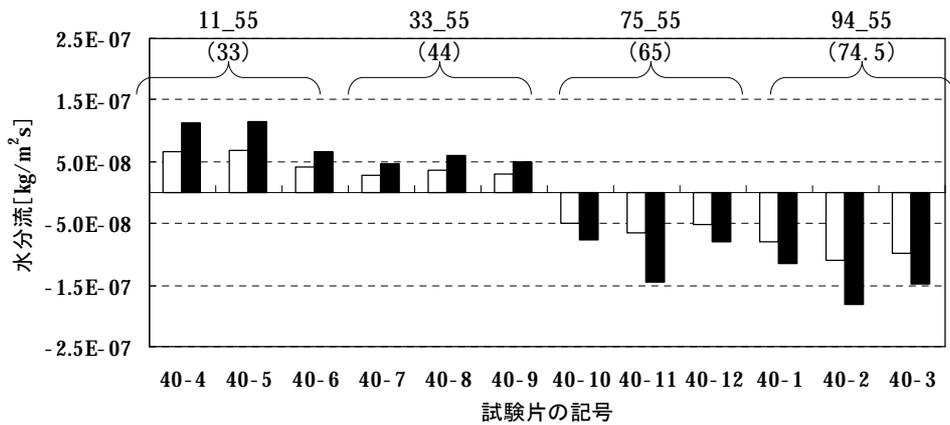
以上をまとめると、本測定で用いたコンクリートは、湿気伝導率について、平均値の 0.7~1.3 倍程度のばらつきを持ち、高湿度域で最大 1.0×10^{-12} kg/msPa 程度の差が生じる。



(a) Fc27



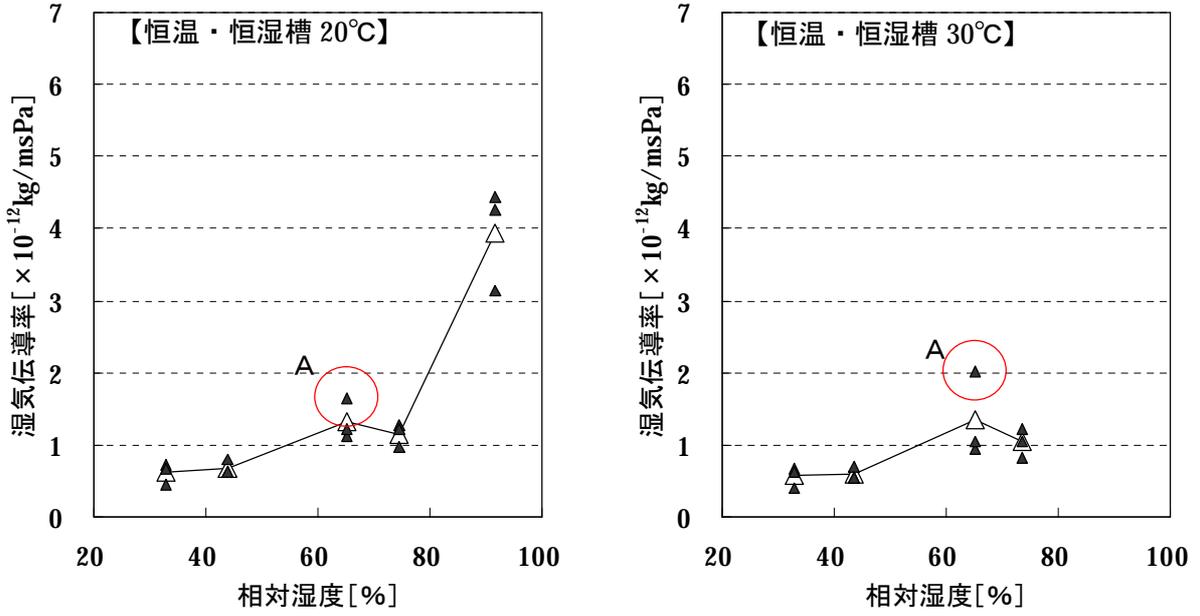
(b) Fc33



(c) Fc40

図 3.10 定常水分流の比較（白：周辺雰囲気温度 20°C、黒：周辺雰囲気温度 30°C）

※11_55 (33) はビーカー内飽和塩水溶液が平衡する相対湿度 11%、恒温・恒湿槽の相対湿度 55%、それらの平均 33%を意味する。



黒色シンボル：恒温・恒湿槽 20°Cでの測定
 白色シンボル：恒温・恒湿槽 30°Cでの測定

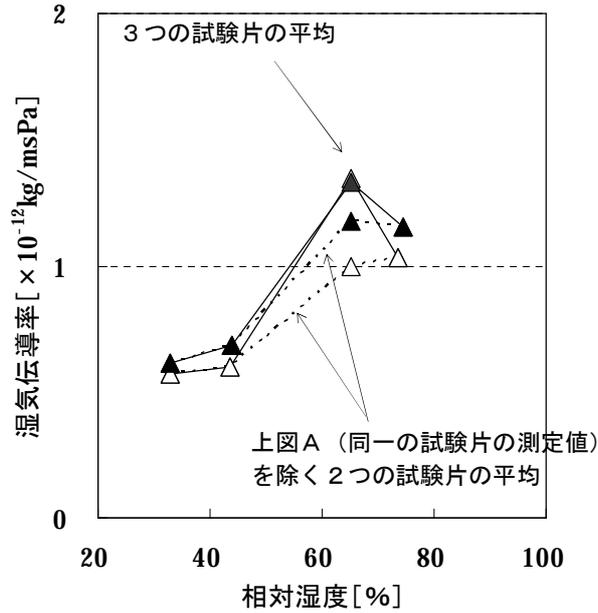


図 3.11 Fc40、湿気伝導率の測定結果

3-3-4 湿気伝導率算定に用いた湿気伝達率・湿気伝達抵抗（文献値）の影響

本測定では試験片上面の湿気伝達率およびピーカー内空気の湿気伝達抵抗に文献値 [55] を用いたが、それらの数値が異なる場合、得られる湿気伝導率がどのように変化するかを一次元の定常計算によって検討した。

試験体上面での湿気伝達抵抗は他の抵抗（材料内の湿気伝導抵抗、ピーカー内の湿気伝達抵抗）に比べて小さいため、試験体上面での湿気伝達率を変えても得られる湿気伝導率はほとんど変化しない。そこで、ピーカー内空気の湿気抵抗を 2 倍または 1/3 倍に変えた場合について計算を行った。計算結果を表 3.6 に示す。

文献値を用いて得られる湿気伝導率を基準にした場合、低湿度域で 0.94~1.12 倍、中湿度域で 0.99~1.02 倍、高湿度域で 0.95~1.08 倍に変化する。低湿度域で影響が大きいのは、湿流が下向きで抵抗値が上向き湿流よりも 6 倍ほど大きいためである。高湿度域で影響が大きいのは、湿流は上向きであるが液水移動の影響が大きく、水分流が増加するためである。この傾向は、強度が大きいほど変化の幅が若干小さくなるが、すべての強度に共通している。

表 3.6 ビーカー内空気の湿気伝達抵抗が湿気伝導率の計算結果に及ぼす影響

強度	温度 [°C]	相対湿度条件	文献値	文献値×2		文献値÷3	
			湿気伝導率 (計算結果)	湿気伝導率 (計算結果)	差	湿気伝導率 (計算結果)	差
Fc27	20	55_11 (33)	0.89	0.96	1.08	0.85	0.96
		55_33 (44)	1.25	1.40	1.12	1.17	0.94
		55_75 (65)	1.50	1.53	1.02	1.48	0.99
		55_94 (74.5)	1.61	1.65	1.02	1.59	0.99
		83_100 (91.5)	5.44	5.88	1.08	5.18	0.95
	30	55_11 (33)	0.82	0.87	1.07	0.78	0.96
		55_32 (43.5)	0.81	0.86	1.07	0.77	0.96
		55_75 (65)	1.21	1.23	1.02	1.20	0.99
		55_92 (73.5)	1.32	1.34	1.02	1.30	0.99
		Fc33	20	55_11 (33)	0.70	0.74	1.06
55_33 (44)	0.90			0.97	1.08	0.86	0.95
55_75 (65)	1.29			1.31	1.02	1.27	0.99
55_94 (74.5)	1.49			1.53	1.02	1.47	0.99
83_100 (91.5)	5.32			5.74	1.08	5.07	0.95
30	55_11 (33)		0.65	0.68	1.05	0.63	0.97
	55_32 (43.5)		0.75	0.80	1.07	0.72	0.96
	55_75 (65)		1.07	1.09	1.01	1.06	0.99
	55_92 (73.5)		1.28	1.30	1.02	1.27	0.99
	Fc40		20	55_11 (33)	0.62	0.65	1.05
55_33 (44)		0.68		0.72	1.06	0.66	0.97
55_75 (65)		1.17		1.19	1.02	1.16	0.99
55_94 (74.5)		1.16		1.18	1.02	1.15	0.99
83_100 (91.5)		3.94		4.15	1.05	3.81	0.97
30		55_11 (33)	0.57	0.60	1.05	0.55	0.97
		55_32 (43.5)	0.59	0.62	1.05	0.58	0.97
		55_75 (65)	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
		55_92 (73.5)	1.04	1.05	1.01	1.03	0.99

※11_55 (33) はビーカー内飽和塩水溶液（または蒸留水）が平衡する相対湿度 11%、恒温・恒湿槽の相対湿度 55%、それらの平均が 33%を意味する

※湿気伝導率の単位は $[\times 10^{-12} \text{kg/msPa}]$

※差は文献値を用いて得られる湿気伝導率に対して何倍かを表す

3-4 平衡含水率の測定

3-4-1 測定方法

平衡含水率の測定は簡易デシケータ法 [54] に準じた方法で行った。測定の概要を図 3.12 に示す。温度 20°C、相対湿度 60%に制御された恒温・恒湿室（または恒温・恒湿槽）に所定の飽和塩水溶液（ $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 、 NaCl 、 KCl 、 KNO_3 の 4 種類で、各飽和塩水溶液に平衡する相対湿度は、33%、75%、85%、94%である）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 105°C で 24 時間乾燥させた状態の試験片を、放湿過程の場合は試験片作成後 30 日以上水中に浸漬した試験片を温・湿度計とともに 3 個（厚さ 1.0cm の試験片が 2 個、厚さ 1.5cm の試験片が 1 個）ずつ入れて密閉し、試験片が湿気平衡に達するまで放置した（写真 3.3 を参照）。

厚さ 1.5cm の試験片を代表試験片として、その重量を一週間程度の間隔毎に測定し、重量変化から厚さ 1.0cm の試験片を含むすべての試験片が湿気平衡状態に達したかどうかを判断した。その後、すべての試験片の重量を測定した。

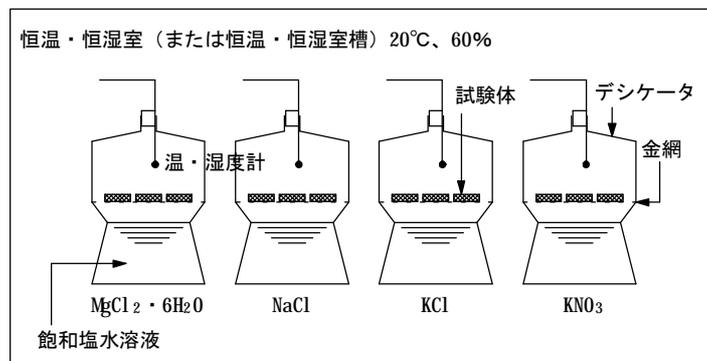


図 3.12 平衡含水率測定の概要



写真 3.3 平衡含水率測定、試験片の設置状況

3-4-2 重量変化の測定結果

代表試験片の重量変化の測定結果をデシケータ内の温・湿度の測定結果とともに図 3.13～図 3.15 に示す。重量は 105℃、24 時間乾燥後に測定した重量からの増減で示している。図中の「設定相対湿度」とは用いた飽和塩水溶液が平衡する相対湿度のことである。

放湿過程の測定と Fc33 および Fc40 の吸湿過程の測定の多くは、ほぼ平衡に達していると思われるが、Fc27 の吸湿過程・33%の測定など、まだ完全に平衡に達していないと思われる測定がいくつかある。しかしながら、種々の制約により測定を終えなければならなかったため、本論ではすべての測定が平衡に達したものと見なす。

湿気平衡時の重量 q_b と、事前に測定しておいた 105℃、24 時間乾燥させた後の重量 q_d から試験片内の水分体積 V_w を求め、これも事前に測定しておいた 30 日以上水中に浸漬した後の重量 q_s と、そのときの水中における見かけの重量 q_t からアルキメデス法によって試験片正味の体積 V を求め、それらから平衡含水率（体積基準） y_b を算定した。なお、試験片正味の体積の算定方法は JIS A 1110（粗骨材の密度及び吸水率試験方法）を参考にした。

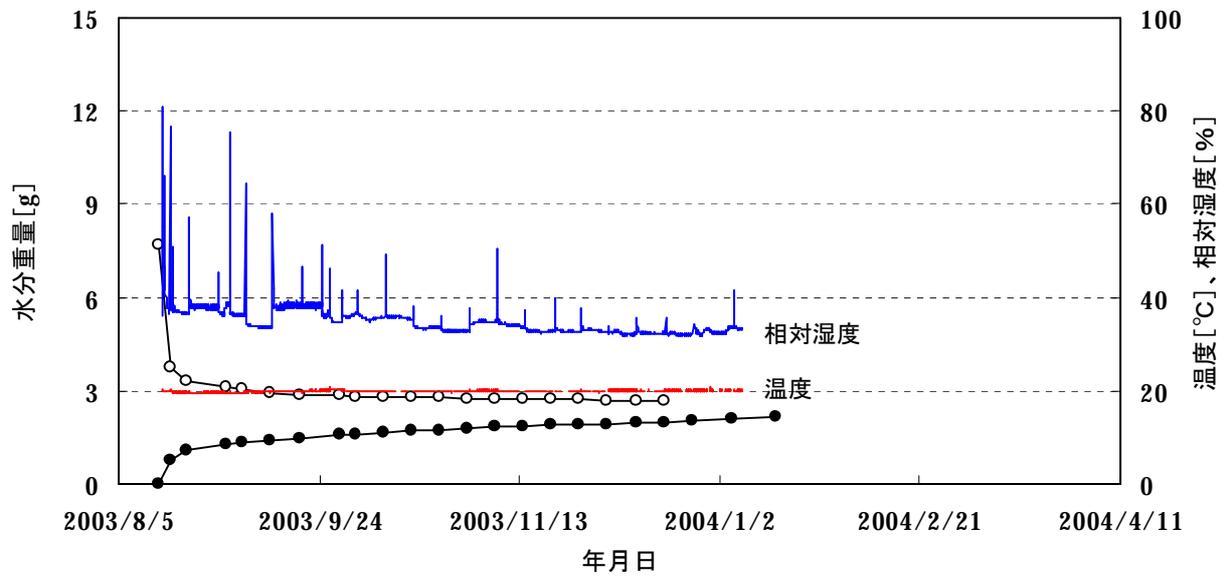
$$y_b = V_w / V \quad (3.17)$$

$$V_w = (q_b - q_d) / r_w \quad (3.18)$$

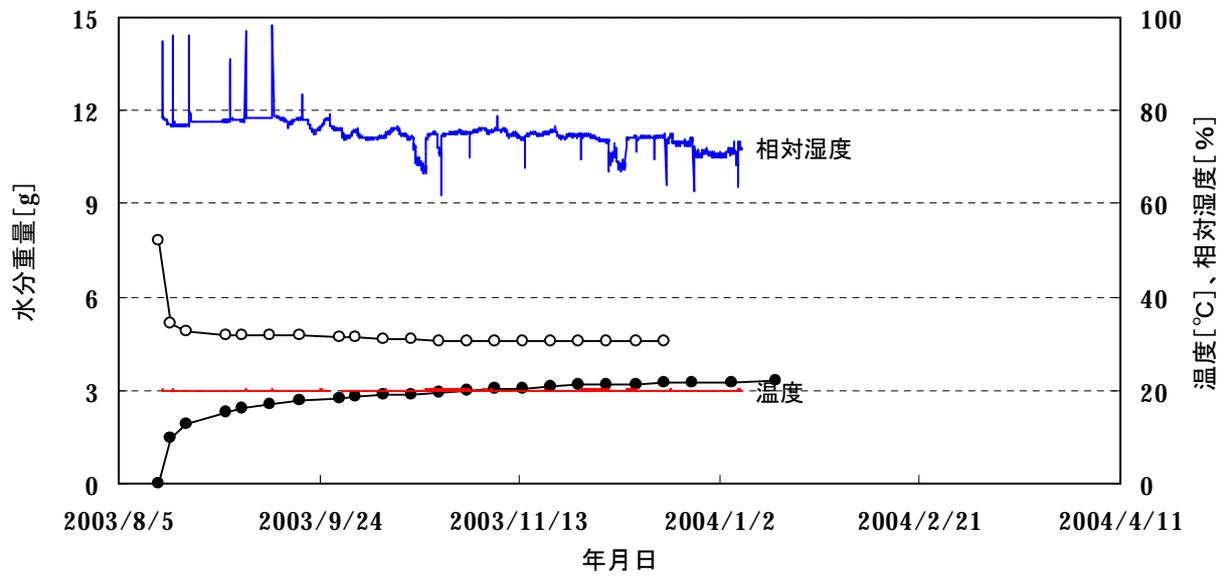
$$V = (q_s - q_t) / r_w \quad (3.19)$$

ここで、

V : 試験片の体積 [m^3]、 V_w : 湿気平衡時の水分の体積 [m^3]、 q_b : 湿気平衡時の試験片の重量 [kg]、 q_d : 105℃、24 時間乾燥させた後の試験片の重量 [kg]、 q_s : 30 日以上水中に浸漬した後の試験片の重量 [kg]、 q_t : 水中における試験片の見かけの重量 [kg]、 r_w : 水の密度 [kg/m^3]、 y_b : 平衡含水率（＝湿気平衡時の体積含水率） [m^3/m^3]

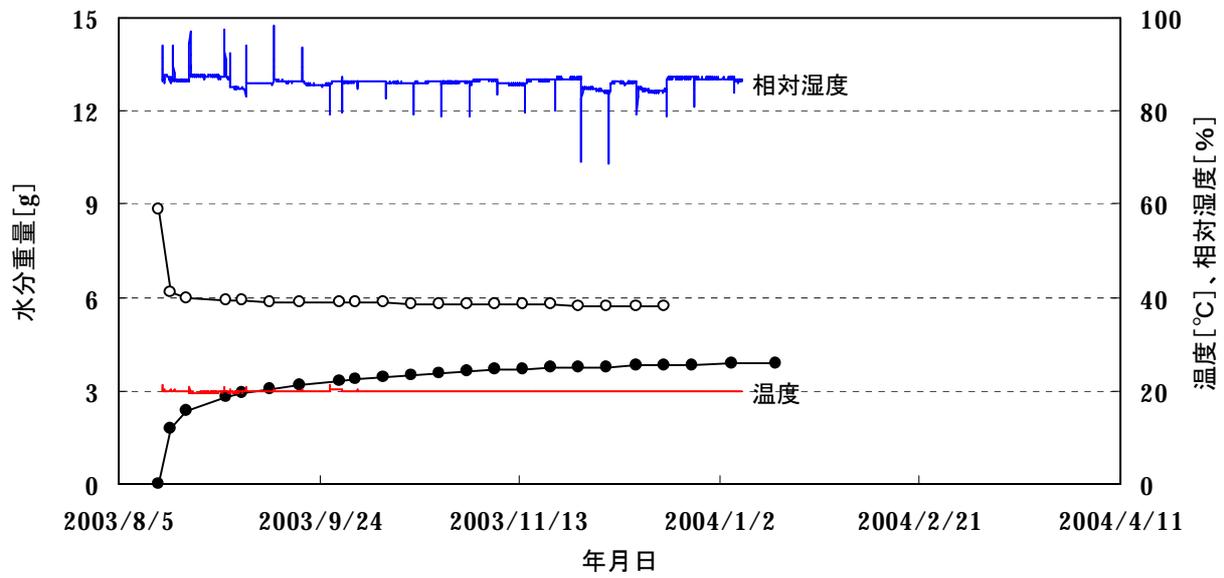


(a) 設定相対湿度 33%

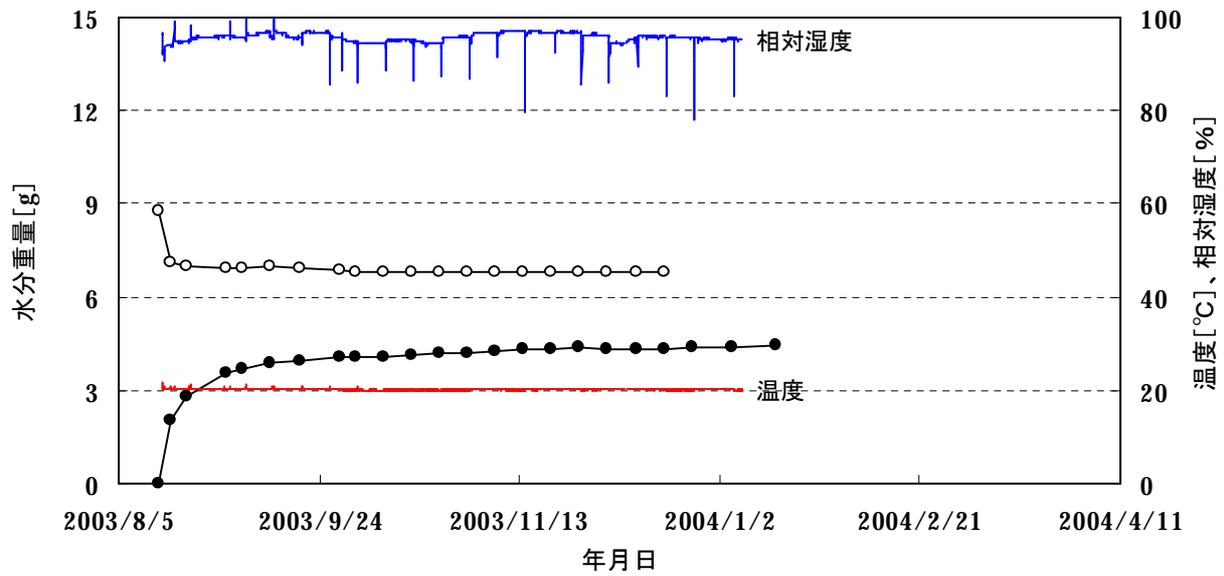


(b) 設定相対湿度 75%

図 3.13 代表試験片の重量変化 (Fc27)
 ※○は放湿過程を、●は吸湿過程を表す。

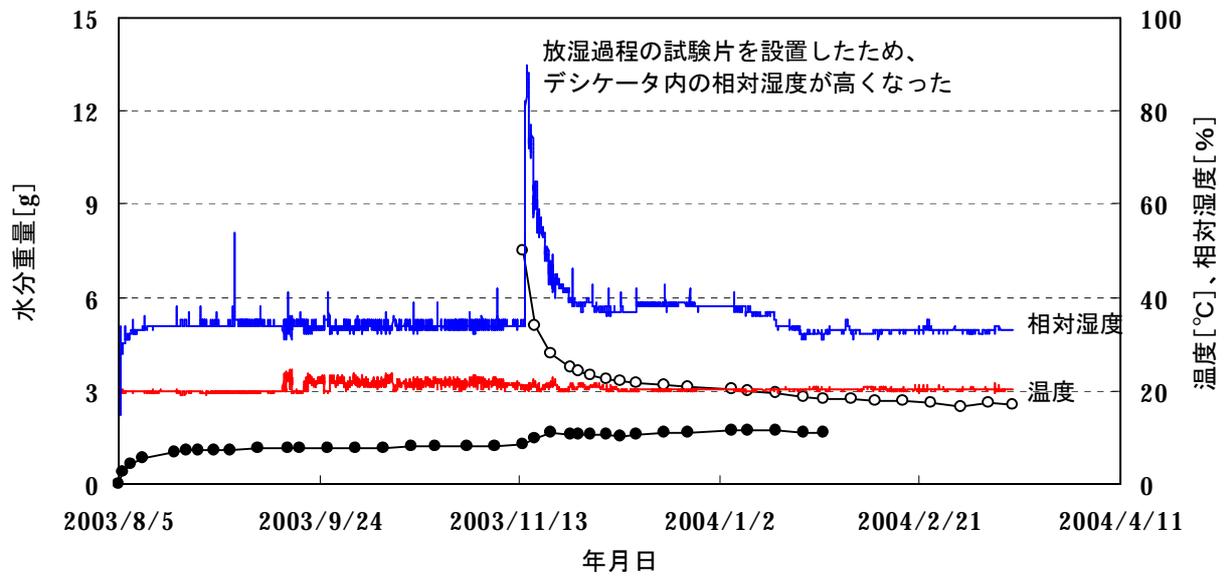


(c) 設定相対湿度 85%

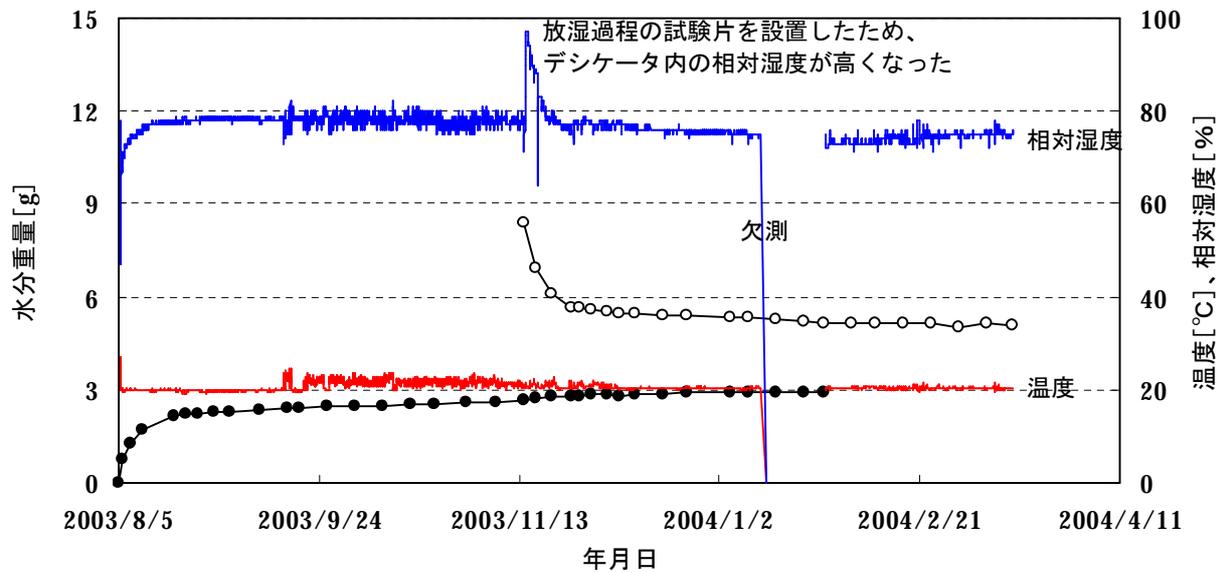


(d) 設定相対湿度 94%

図 3.13 代表試験片の重量変化 (Fc27)
 ※○は放湿過程を、●は吸湿過程を表す。



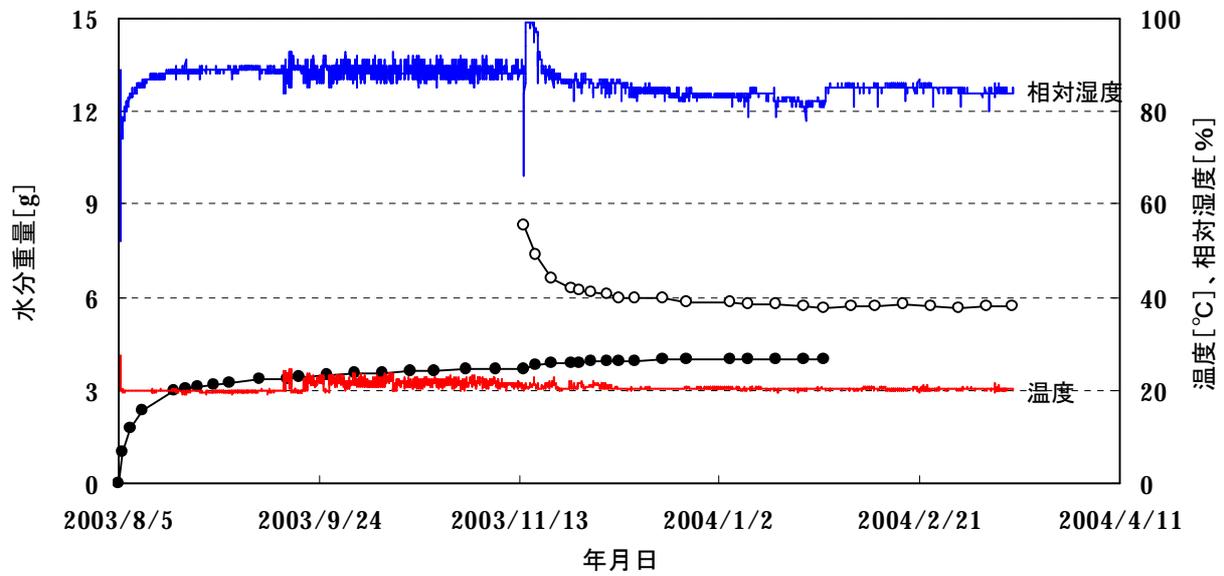
(a) 設定相対湿度 33%



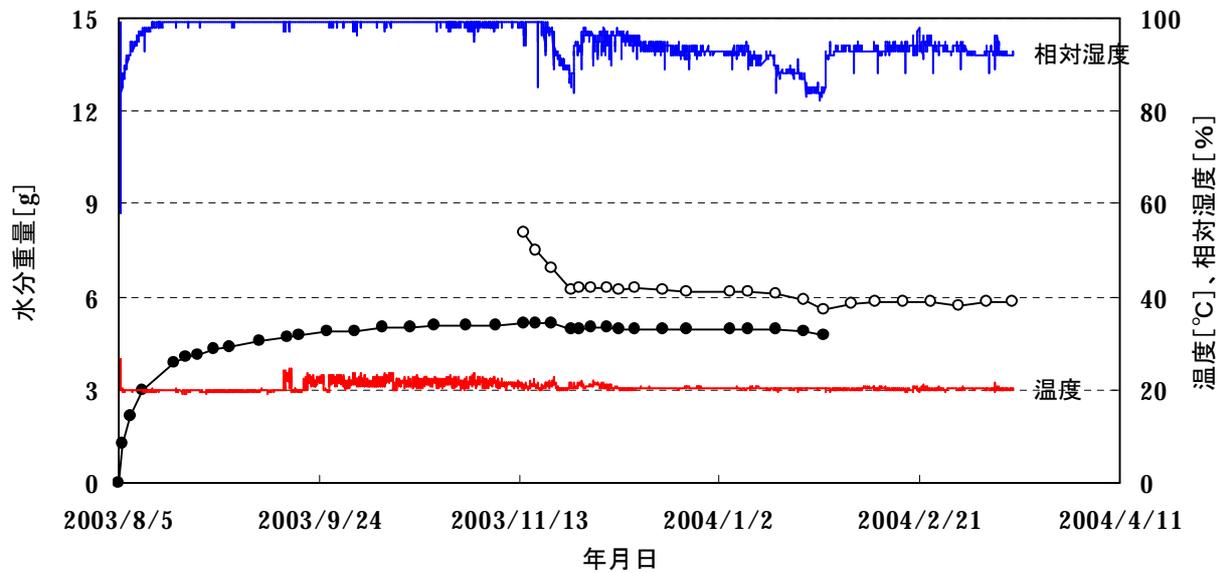
(b) 設定相対湿度 75%

図 3.14 代表試験片の重量変化 (Fc33)

※○は放湿過程を、●は吸湿過程を表す。

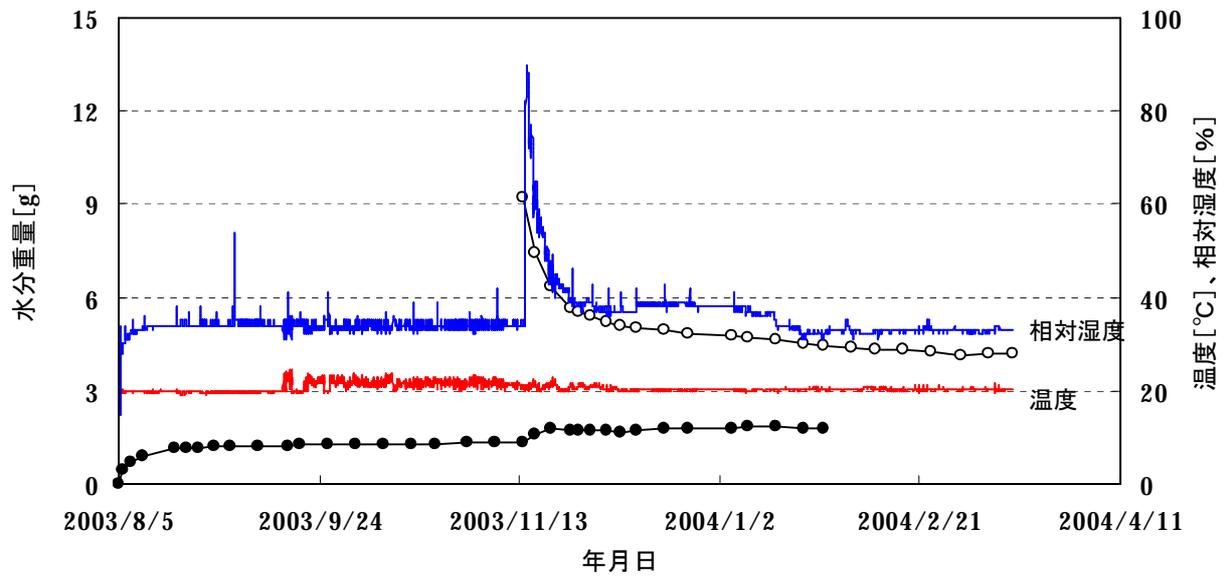


(c) 設定相対湿度 85%

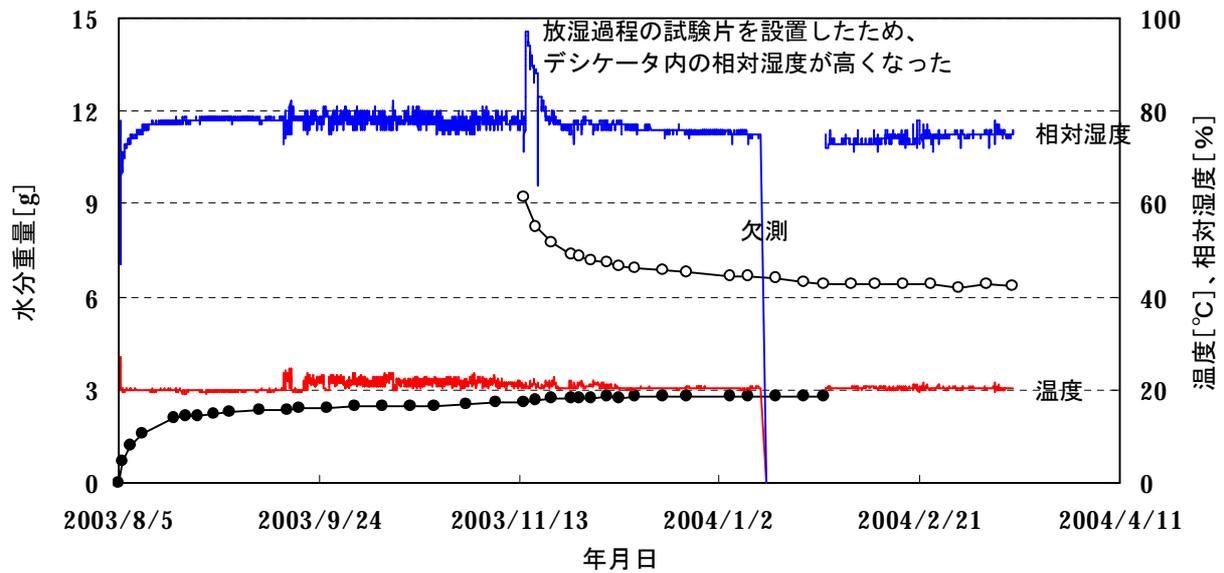


(d) 設定相対湿度 94%

図 3.14 代表試験片の重量変化 (Fc33)
 ※○は放湿過程を、●は吸湿過程を表す。

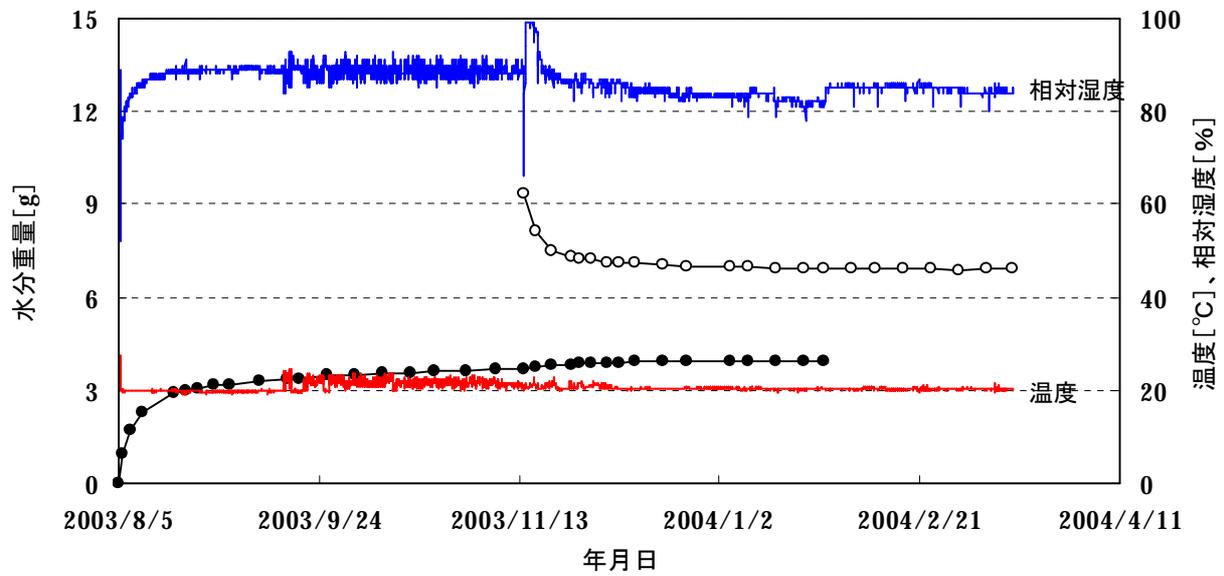


(a) 設定相対湿度 33%

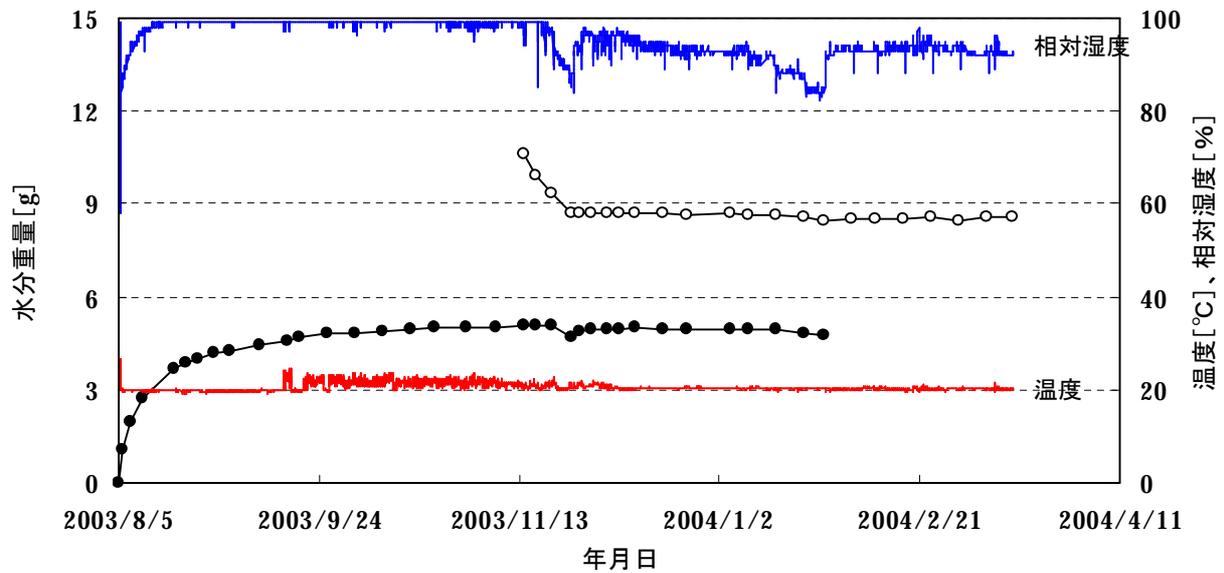


(b) 設定相対湿度 75%

図 3.15 代表試験片の重量変化 (Fc40)
※○は放湿過程を、●は吸湿過程を表す。



(c) 設定相対湿度 75%



(d) 設定相対湿度 94%

図 3.15 代表試験片の重量変化 (Fc40)
 ※○は放湿過程を、●は吸湿過程を表す。

3-4-3 平衡含水率の算定結果と考察

平衡含水率関係（平衡含水率と相対湿度との関係）を図 3.16 に示す。対応する相対湿度には、初期の激しい吸放湿が落ち着いた測定の後半 1/3 程度（例えば Fc27 の吸湿過程では 102 日から 154 日までの 52 日間）における測定値の平均を用いた。

吸湿過程および放湿過程の相対湿度 80%以上の湿度域では、強度が高いほど平衡含水率は大きい傾向にある。逆に、吸湿過程の相対湿度 80%未満の湿度域では、強度が低いほど平衡含水率が大きい。これらは空隙の径および分布状況の違いが影響していると考えられるが、今回の測定では空隙構造の詳細なデータが得られていないので、本論での考察は差し控える。

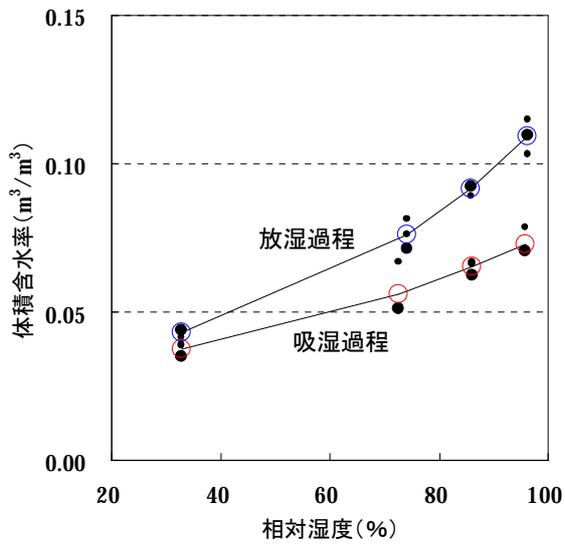
Fc27 と Fc33 の測定結果との差を Fc33 と Fc40 の測定結果との差と比較すると、放湿過程ではほぼ全域、吸湿過程では低湿度域で前者の方が大きく、湿気伝導率の測定結果と様相が異なる。この理由についても空隙構造が密接に関係すると思われるので、コンクリートの空隙構造と強度および湿気物性値との関係については、今後検討すべき課題であると考ええる。

本測定における湿度域では、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（履歴）現象が確認された。

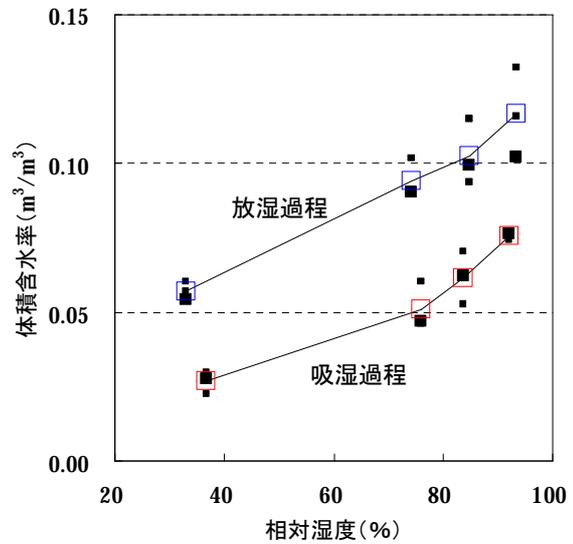
測定値の平均を基準とすると、Fc27 では吸湿過程、放湿過程とも設定相対湿度 75%での測定結果のばらつきが大きく、0.90~1.19 倍の範囲にある。Fc33 および Fc40 では、吸湿過程は設定相対湿度 75%と 85%の測定結果で、放湿過程は設定相対湿度 85%と 94%の測定結果でばらつきが大きく、それぞれ 0.85~1.18 倍と 0.83~1.13 倍の範囲であった。平均値との差は、Fc40 の放湿過程、設定相対湿度 94%の試験片が最大で、 $0.02\text{m}^3/\text{m}^3$ であった。

以上をまとめると、本測定で用いたコンクリートは平衡含水率について、平均値の 0.8~1.2 倍程度のばらつきを持ち、高湿度域で最大 $0.02\text{m}^3/\text{m}^3$ 程度の差が生じ得ると言える。

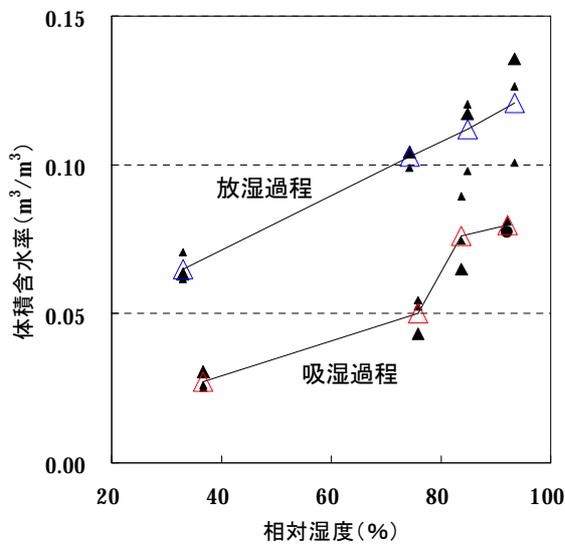
なお、試験片の厚さの違いによる明確な差異は現れなかった。また、乾燥時の平均密度は、Fc27 で $2165.7\text{kg}/\text{m}^3$ 、Fc33 で $2182.2\text{kg}/\text{m}^3$ 、Fc40 で $2141.1\text{kg}/\text{m}^3$ であった。



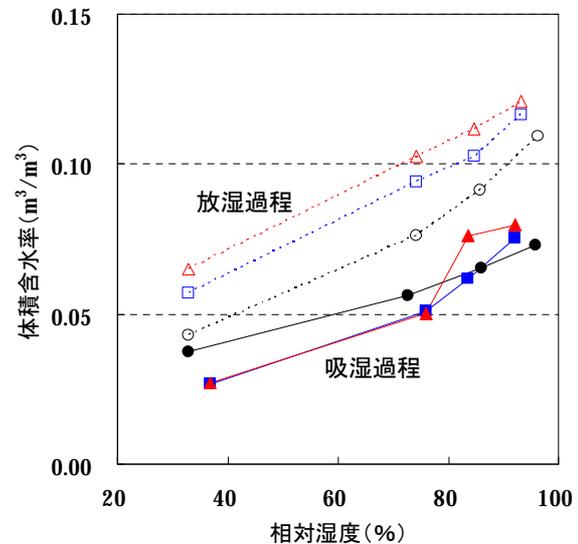
(a) Fc27



(b) Fc33



(c) Fc40



(d) 全強度

図 3.16 平衡含水率の測定結果 (平衡含水率関係)

※各強度の白色シンボルは平均値を、大きい黒色シンボルは厚さ 15mm の試験片の測定値を、小さい黒色シンボルは厚さ 10mm の試験片の測定値を示す。

※全強度の白色シンボルは吸湿過程、黒色シンボルは放湿過程の結果を示す。

※丸印は Fc27 を、四角形は Fc33 を、三角形は Fc40 を示す。

3-4-4 乾燥および飽水期間についての考察

平衡含水率測定の見直しに向けて、試料の乾燥と飽水については乾燥温度が提案されているが、試料の性質変化を考慮して乾燥時間や水中浸漬に関する規定は提案されていない [54]。

完全に乾燥または飽水した状態で測定することが理想ではあるが、コンクリートの場合、長期の乾燥はクラック等の欠陥が生じる可能性があり、長期の水中浸漬は水和反応が進み強度が増加する一方、試験体からカルシウムが溶出するなどの問題がある。

図 3.17 と図 3.18 は、105℃で乾燥させた期間と試験片重量の変化との関係、および水中浸漬期間と試験片重量の変化との関係を示したものである。いずれも 1 日で重量は大きく変化し、その後は徐々に減少または増加傾向にある。乾燥または水中浸漬の 1 日後の重量に比べて 1 週間後の重量は、乾燥では 0.88~0.96 倍に、水中浸漬では 1.02~1.04 倍に増減している。

本測定では 30 日以上水中に試験片を浸漬したが、図 3.18 から、試験片はほぼ飽水に達していたと思われる。カルシウムの溶出が多少見られたが、コンクリートの性質を変化させるほどの量ではなかった。乾燥については、図 3.17 から、もっと乾燥すべきではないかと考えられるが、試験片が薄く欠陥が生じやすいことから、今回の測定での乾燥時間は 24 時間とした。

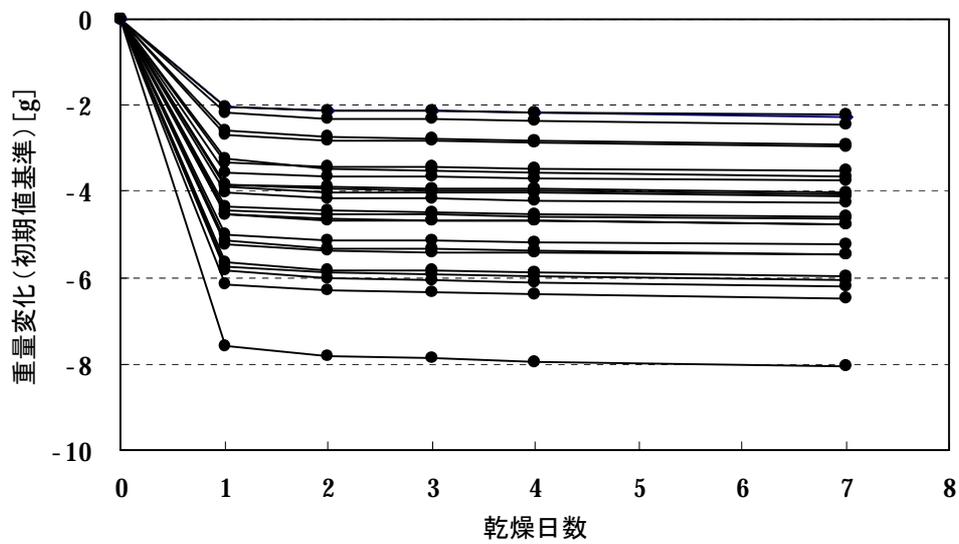


図 3.17 乾燥期間と重量変化との関係

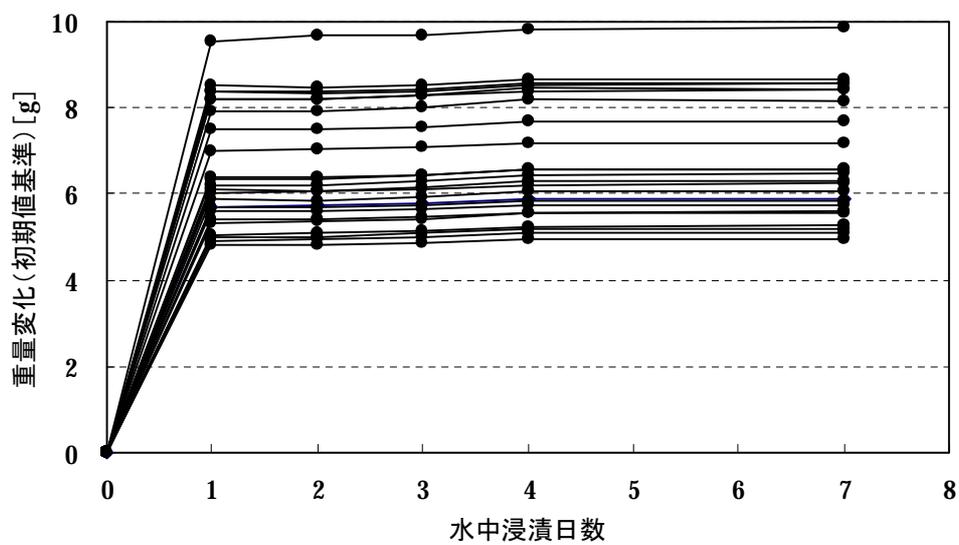


図 3.18 水中浸漬期間と重量変化との関係

3-5 透水係数の測定

3-5-1 測定方法

測定は岸本らの測定方法 [56] を参考にした。図 3.19 および写真 3.4 に測定装置を示す。

側面をアラルダイトとアルミ箔を用いて断湿した試験片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（測定期間を短縮するために行った）。その後、20°Cに制御された恒温槽内の測定装置に試験片を設置した。水頭差によって水分が移動するように配置したメスピペットの目盛りを読み取り、単位時間あたりの水分の移動量を定常になるまで測定した。測定中の蒸発の影響は、微小な穴を開けたビニールで測定装置の上部を覆うことで抑えた。なお、測定は各強度とも3個の試験片を用いて行った。

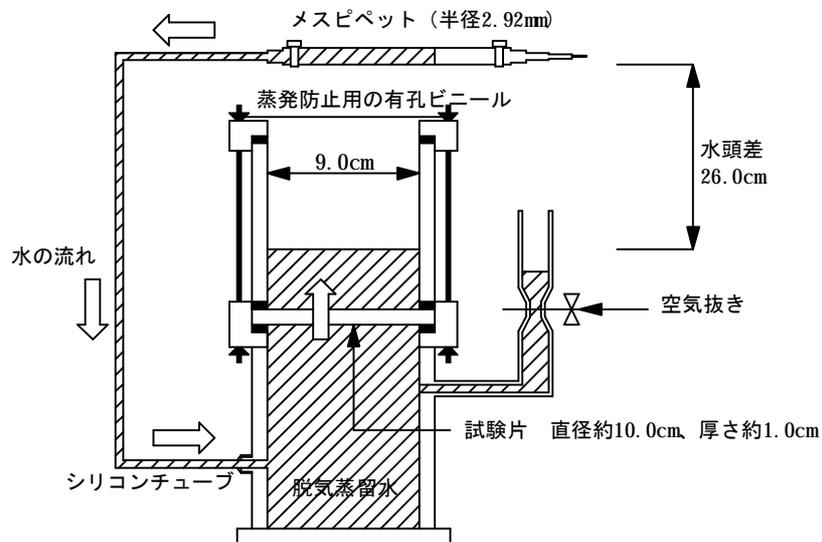


図 3.19 透水係数の測定装置



写真 3.4 透水係数の測定装置

3-5-2 水分の移動速度の測定結果

メスピペット内水分の累積移動距離の測定結果を図 3.20 に示す。測定の後半 7 点の測定値を用いて求めた移動速度と測定の後半 6 点の測定値を用いて求めた移動速度の差および測定結果への影響を表 3.7 に示す。測定結果への影響は最大で 3.5% 程度であったので、移動速度は試験開始 75～175 時間以降では定常に達していたものと見なした。比較的早くに定常に達したのは、脱気蒸留水を用いたためと考えられる。

測定後半の 6 点の測定値から求めた移動速度の定常値とメスピペットの断面積から (3.20) 式より単位時間あたりの水分の移動量を求めた。これと試験片の面積 A と厚さ d および水頭差 $\Delta\Psi$ を用いて、(3.21) 式のダルシー則より透水係数を算定した。なお、本測定では試験片上部の水位が水分の移動と水面での蒸発によって変動する。測定終了時の水位は最大で 3mm 程度低かったが、この水頭差の変化の影響は透水係数に換算すると 1% 未満であったので、水頭差は定数 (0.26m) として扱った。

$$J_M = va \tag{3.20}$$

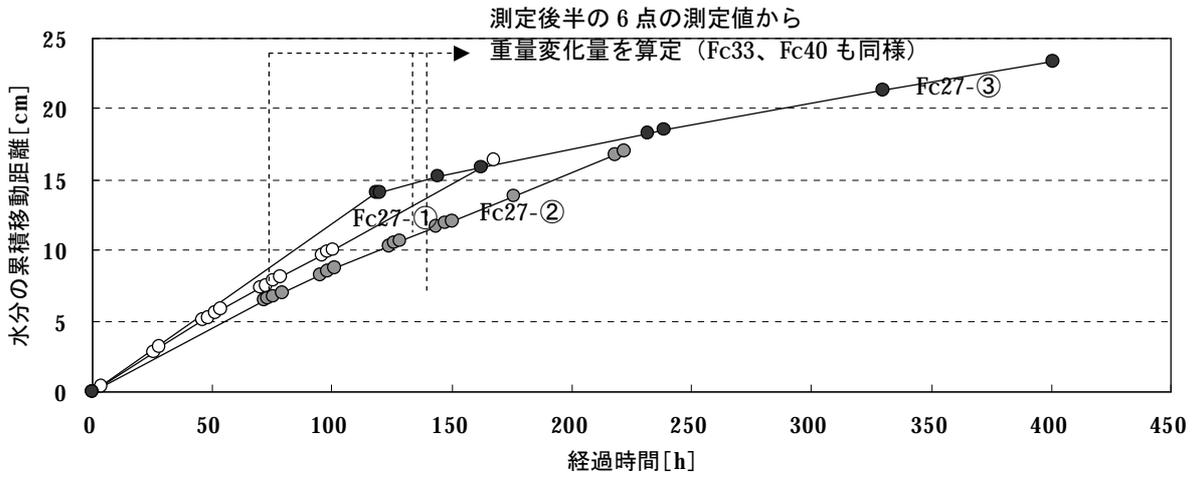
$$J_M = KA \frac{\Delta\Psi}{d}, \left(K = \frac{J_M d}{A \Delta\Psi} \right) \tag{3.21}$$

ここで、

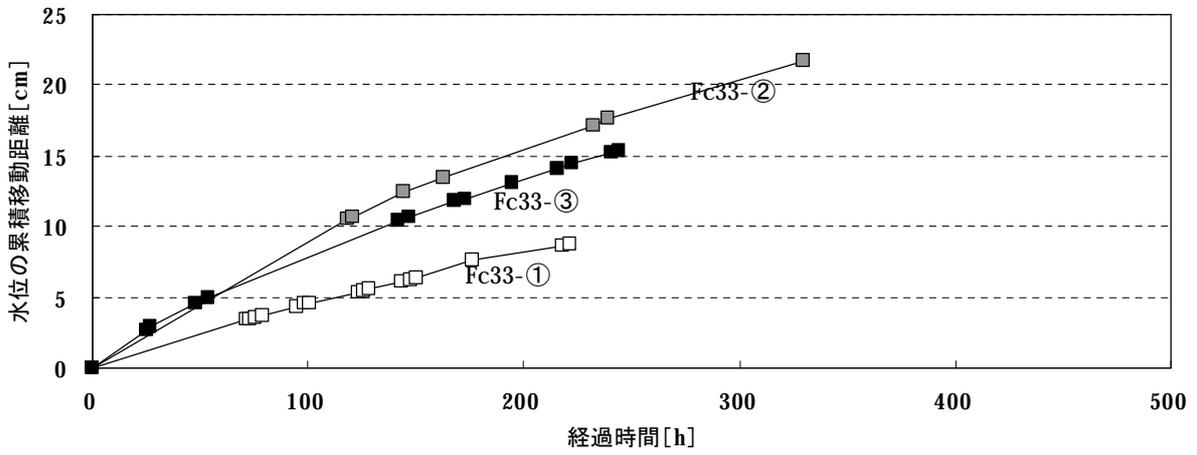
A : 試験片の面積 [m²]、 a : メスピペットの断面積 [m²]、 d : 試験片の厚さ [m]、 J_M : 単位時間あたりの水分の移動量 [m³/s]、 K : 透水係数 [m/s]、 v : メスピペット内を移動する水分の速度 [m/s]、 $\Delta\Psi$: 水頭差 [m]

表 3.7 測定の後半 7 点の測定値から求まる水分の移動速度と
測定の後半 6 点の測定値から求まる水分の移動速度との差

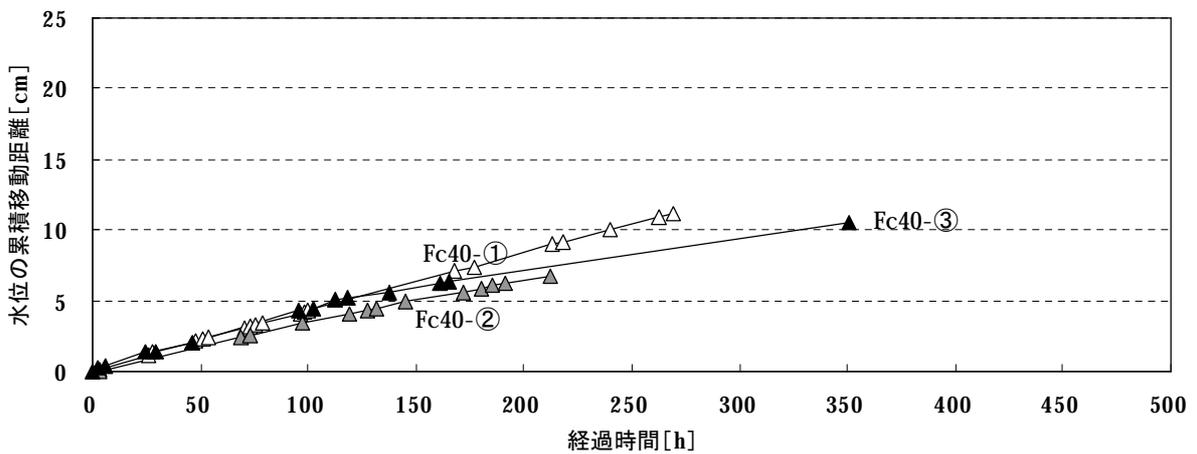
Fc27	試験片番号	Fc27-①	Fc27-②	Fc27-③
	差 [m/h] (誤差 [%])	2.50×10 ⁻⁷ (0.03)	1.52×10 ⁻⁶ (0.22)	8.07×10 ⁻⁶ (2.49)
Fc33	試験片番号	Fc33-①	Fc33-②	Fc33-③
	差 [m/h] (誤差 [%])	4.99×10 ⁻⁶ (1.47)	8.81×10 ⁻⁶ (1.66)	1.76×10 ⁻⁶ (0.37)
Fc40	試験片番号	Fc40-①	Fc40-②	Fc40-③
	差 [m/h] (誤差 [%])	2.05×10 ⁻⁶ (0.50)	1.01×10 ⁻⁵ (3.50)	5.28×10 ⁻⁶ (2.25)



(a) Fc27



(b) Fc33



(c) Fc40

図 3.20 透水係数測定におけるメスピペット内水分の累積移動距離変化

3-5-3 透水係数の算定結果と考察

透水係数の測定結果を図 3.21 に示す。なお、横軸は水セメント比である。

透水係数は水セメント比が大きいほど、すなわち強度が低くなるほど大きくなる傾向にある。透水係数と強度との関係は、湿気伝導率と強度との関係と同様に、強度が高いほどセメントペースト内でのセメント粒子間の距離が短くなり [50]、水分が材料内を移動しにくくなるためと考えられる。また、強度が低いとブリージング水が多くなり、その結果、骨材周囲の遷移帯と呼ばれる連続気泡が増え、水みちも形成されやすいこと [50] も理由として考えられる。

測定値の平均を基準とすると、測定結果は Fc27 では 0.55~1.40 倍、Fc33 では 0.68~1.25 倍、Fc40 では 0.78~1.32 倍の範囲にある。平均値との差の最大値は強度が低いほど大きく、Fc27 から順に、 $1.39 \times 10^{-11} \text{m/s}$ 、 $0.76 \times 10^{-11} \text{m/s}$ 、 $0.52 \times 10^{-11} \text{m/s}$ である。このような強度とばらつきとの間の明確な関係は透水係数の測定結果にのみ見られ、他の水分移動に関する物性値では見られなかった。

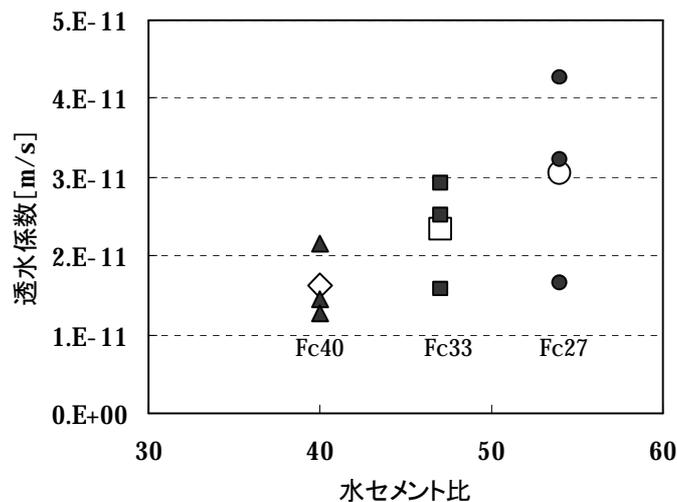


図 3.21 透水係数の測定結果

※小さいシンボルが測定値を、大きいシンボルが平均値を示す。

3-6 熱伝導率の測定

3-6-1 測定方法

熱伝導率は熱流計法（JIS A 1412-2）によって測定を行った（写真 3.5 を参照）。試験体の上下に当たる広面はシリコンゴム（熱抵抗値は上下合わせて $0.047\text{m}^2\text{K/W}$ ）で、側面はビニルテープで断湿した。設定した温度差は 15°C （高温側が 27.5°C 、低温側が 12.5°C ）で、1 体あたりの試験時間は約 3 時間である。

表 3.8 に測定の手順および条件を示す。測定は同じ試験体について含水状況を変えて行った。水中浸漬をあまり長期に行うと飽水状態になってしまうと判断し、高含水条件における水中浸漬は 2 日間にとどめた。測定装置に合わせて試験体を作成したため、その大きさは比較的大きく、含水状況が内部で一様になりにくいと考えられた。その対策として養生を長期間行い、養生中は試験体の上下を週に 1 回程度の頻度で反転させた。養生中の水分蒸発は、写真 3.6 に示すようにポリ塩化ビニリデン製のラップを何重も試験体に巻くことで防いだ。乾燥については、試験体が厚く欠陥が生じにくいと判断して 30 日間にわたって行った。また、測定中の潜熱の影響を知るために、熱伝導率測定前後における試験体重量の測定を行った。



写真 3.5 熱伝導率の測定装置



写真 3.6 養生中の熱伝導率測定用試験体

表 3.8 熱伝導率測定の手順と条件

条件 1 (中含水)	恒温・恒湿室 (20℃・55%または 60%) で約 7 ヶ月間放置	
	↓ 測定	<ul style="list-style-type: none"> ・重量測定 ・断湿して熱伝導率測定 ・重量測定
条件 2 (高含水)	<p>①恒温・恒湿室内 (20℃・55%) で水中に 2 日間浸漬後、重量が条件 1 よりも増加していることを確認</p> <p>②含水率の変動を抑えるためにポリ塩化ビニリデン製のラップを何重も巻いてラッピングを施す</p> <p>③恒温・恒湿室内で約 1 ヶ月間放置 (その間、約 1 週間に 1 回の割合で試験体の上下を反転させる)</p>	
	↓ 測定	<ul style="list-style-type: none"> ・ラッピングの除去 ・重量測定 ・断湿して熱伝導率測定 ・重量測定
条件 3 (低含水)	<p>①40℃に設定した乾燥炉で 3 日間乾燥後、重量が条件 1 よりも減少していることを確認</p> <p>②含水率の変動を抑えるためにポリ塩化ビニリデン製のラップを何重も巻いてラッピングを施す</p> <p>③恒温・恒湿室内で約 1 ヶ月間放置 (その間、約 1 週間に 1 回の割合で試験体の上下を反転させる)</p>	
	↓ 測定	<ul style="list-style-type: none"> ・ラッピングの除去 ・重量測定 ・断湿して熱伝導率測定 ・重量測定
条件 4 (乾燥)	105℃に設定した乾燥炉で 30 日間乾燥させる	
	↓ 測定	<ul style="list-style-type: none"> ・重量測定 ・断湿して熱伝導率測定 ・重量測定

3-6-2 測定結果と考察

熱伝導率の測定結果を図 3.22 に示す。また、試験体ごとの測定値を実線で結んだものを図 3.23 に示す。どの強度のコンクリートにおいても含水率の増加にともない熱伝導率が大きくなる傾向にある。これは、含水率の増加によって熱伝導率の小さい空気が熱伝導率の大きい水に置換されるためである。

測定結果の平均を最小二乗法で直線近似したものを図 3.24 に示す。強度と熱伝導率との間に明確な相関は見られず、粗骨材率との間に弱い相関が見られた（粗骨材率が高いほど熱伝導率が大きい）。よって、空隙内の湿り空気や液水の熱伝導率よりも骨材の熱伝導率の方がコンクリート全体の熱伝導率に及ぼす影響が大きいと考えられるが、粗骨材率の違いが非常に小さいため、このことを確認するには粗骨材率がかなり異なる試験体どうしを比較する必要がある。

測定値の平均を基準とすると、測定結果は 0.9~1.1 倍の範囲内にある。このばらつきは熱水分移動の計算を行う上で無視できないばらつきであることは既往の研究で報告されており、解析においては熱伝導率の値を一定値と見なすのではなく、ばらつきを考慮した計算を行い、結果のばらつきを利用して最終的な評価をすべきとしている [57]。

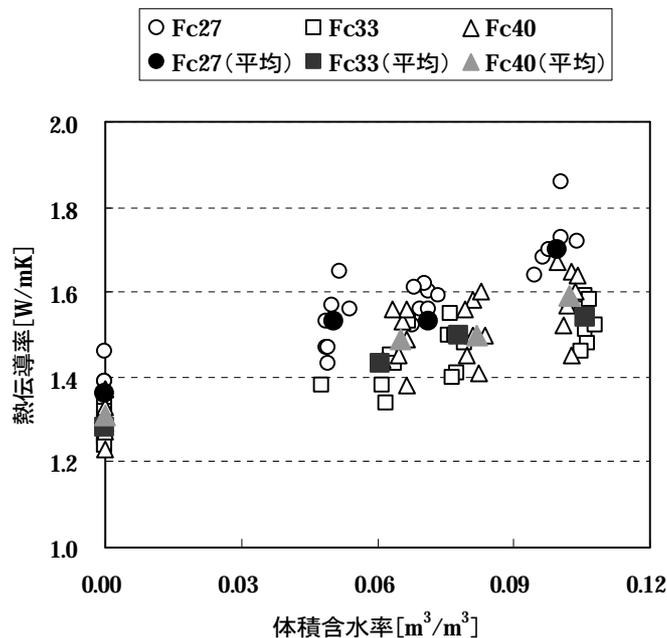


図 3.22 熱伝導率の測定結果（全測定値と平均値）

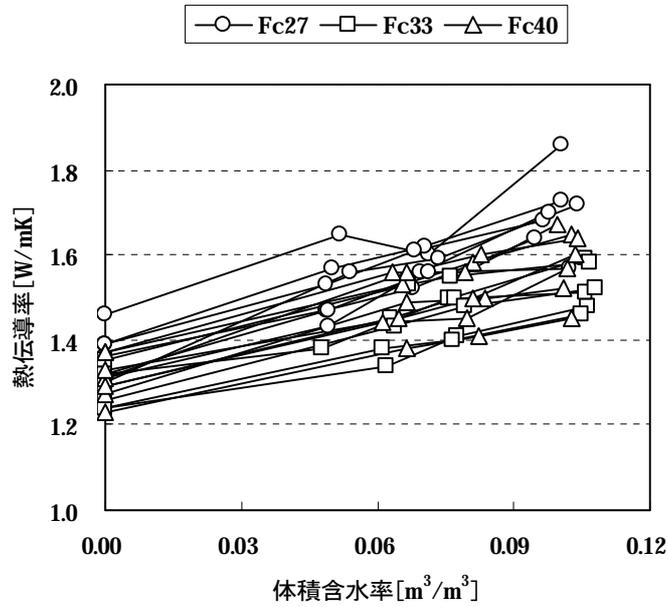


図 3.23 熱伝導率の測定結果（全測定値を試験片ごとに実線で結んだもの）

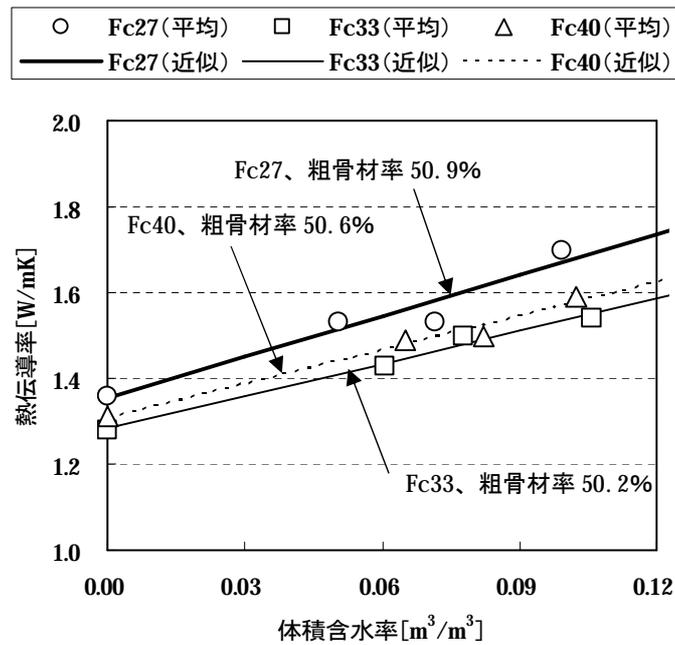


図 3.24 熱伝導率の測定結果（平均値と近似直線）

3-6-3 潜熱の影響

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 [24]。

測定前後における試験体の重量変化は、含水量に対して最大でも 0.75%未満（実質 1.2g/h、 $3.92 \times 10^{-6} \text{kg/m}^2\text{s}$ ）であった（Fc27、高含水条件）。この重量変化のすべてが試験体上下面からの水分蒸発で失われたものとし、材料内での水分移動による温度や含水率への影響が極めて小さいと仮定して、一次元の定常計算により潜熱の影響を検討した。計算モデルを図 3.25 に示す。

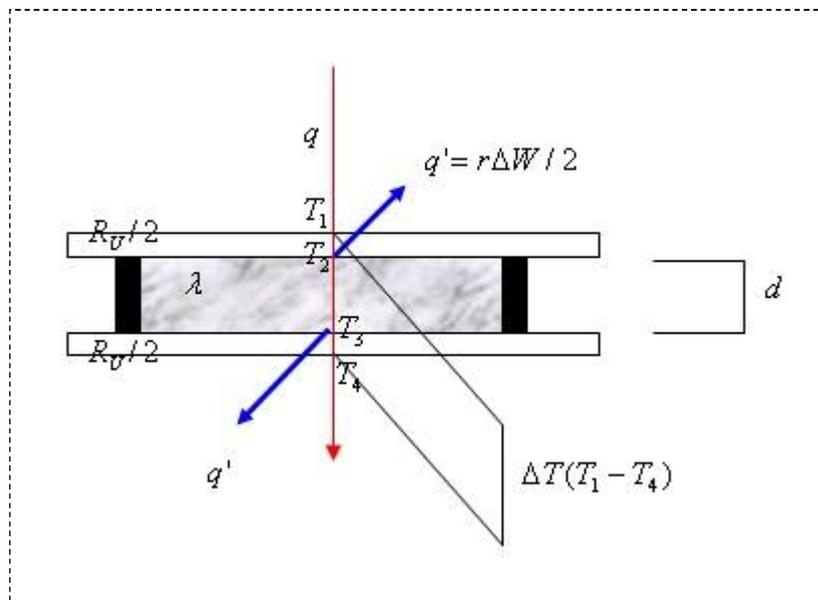


図 3.25 計算モデル（潜熱の影響）

定常時、以下の関係が成り立つ。

$$q = 2(T_1 - T_2) / R_U + q' \quad (3.22)$$

$$q = \frac{\lambda}{d} (T_2 - T_3) \quad (3.23)$$

$$q = 2(T_3 - T_4) / R_U + q' \quad (3.24)$$

よって、

$$l = \frac{qd}{\Delta T - R_U q + R_U q'} \quad \text{ただし、} \quad q' = \frac{r\Delta W}{2} \quad (3.25)$$

潜熱を考慮しない場合は、

$$l = \frac{qd}{\Delta T - R_U q}, \quad \left(q = \frac{\Delta T}{d/l + R_U} \right) \quad (3.26)$$

なお、相変化熱には温度変化を考慮した既存の式を用いた。

$$r = 4186.05\{597.5 - 0.599(T - 273.16)\} \quad (3.27)$$

ここで、

d : 試験片の厚さ [m]、 q : 熱流 [W/m^2]、 q' : 潜熱流 [W/m^2]、 R_U : シリコンゴムの熱抵抗 [$0.047\text{m}^2\text{K}/\text{W}$]、 r : 相変化熱 [J/kg]、 T : 温度 [K]、 l : 熱伝導率 [W/mK]、 ΔT : 温度差 [K]、 ΔW : 単位時間単位面積当たりの重量変化 [$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$]

まず、熱伝導率の測定値を用いて(3.26)式より熱流 q を求める。次に、(3.25)式から潜熱を考慮した場合の熱伝導率を算出し、測定値と比較した。その結果、潜熱の影響を考慮した場合、高含水条件では熱伝導率はFc27が最大1.04倍、Fc33とFc40が最大1.02倍ほど大きくなる。高含水条件以外の条件では、どの強度においても0.99~1.01倍の範囲内であった。よって、全般的に潜熱による影響は小さいと考えられる。

高含水条件では蒸発量が多いので、他の条件に比べて潜熱の影響が大きいとされる。また、潜熱の影響は強度が低いほど大きい傾向にあるが、これは前述の強度と湿気伝導率や透水係数との関係（強度が低いほど水分が移動しやすいこと）が影響していると考えられる。

3-6-4 含水率分布の一様性

熱伝導率測定において試験体の含水状態は一様でなければならない [24]。

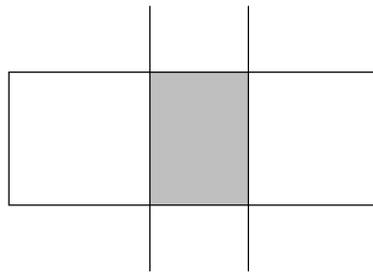
含水状態の一様性については、熱伝導率測定の後、別の試験体ではあるが (Fc24、直径 10cm・高さ 20cm、3 体)、表 3.8 と同様の手順で含水させた試験体を圧縮強度試験機を用いて分割し、各破片の含水率と位置との関係調べることで確認した。

写真 3.7 は 2 日間の水中浸漬後、10 日間の養生の後に分割し、さらに 10 日間放置した試験体の断面と 20 日間の養生の直後に分割した試験体の断面を比較したもので、目視でも含水状態の一様性が確認された。

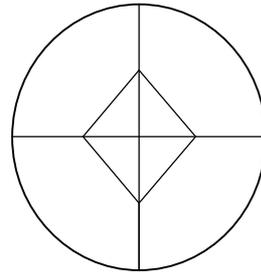
30 日間養生した後に分割した試験体の重量含水率の測定結果を図 3.26 に示す。表層と内部での重量含水率の差は $0.003\text{kg}/\text{m}^3$ 以下 (体積含水率に換算すると約 $0.007\text{m}^3/\text{m}^3$ 以下) であった。試験体の強度、形状、大きさ等が異なるが、この結果から熱伝導率測定に用いた試験体の含水状況は、ほぼ一様であったと思われる。



写真 3.7 試験体の含水状況

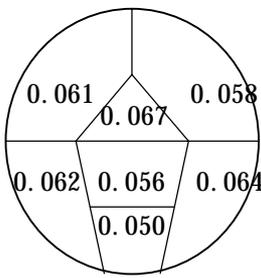


①まず、試験体の中央部を取り出す

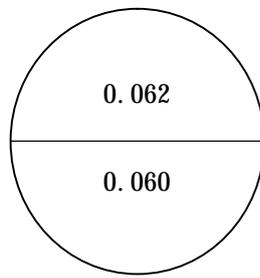


②次に、断面方向を上図のように分割する
(実際には下左端の図のように破壊した)

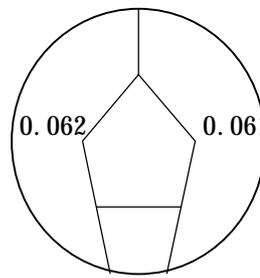
(a) 分割方法



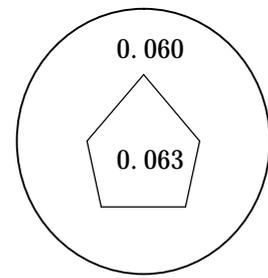
(b) 各破片



(c) 上部と下部



(d) 左部と右部



(e) 表層部と内部

図 3.26 重量含水率の測定結果 (一様性の確認実験、単位 kg/m^3)

3-7 文献値との比較

3-7-1 湿気伝導率

今回の湿気伝導率を文献値 ($2.9 \times 10^{-12} \text{kg/msPa}$ 、相対湿度 72%) [17]、[18] ([58] にも引用) と比較すると、その値は半分程度である。これは、文献値の測定された時期が古く、コンクリートの水セメント比が 70% とかなり大きい (近年用いられているコンクリートでは、水セメント比の上限が JIS で 64% と規定されている)。このことからコンクリート強度が低く、それに応じて湿気伝導率が大きかったものと考えられる。

測定された年代が新しい海外の文献値 [41]、[59]、[60]、[61] と比較すると (図 3.27～図 3.30)、今回の測定値の方が若干低いものの、大部分において良く類似した結果となっている。

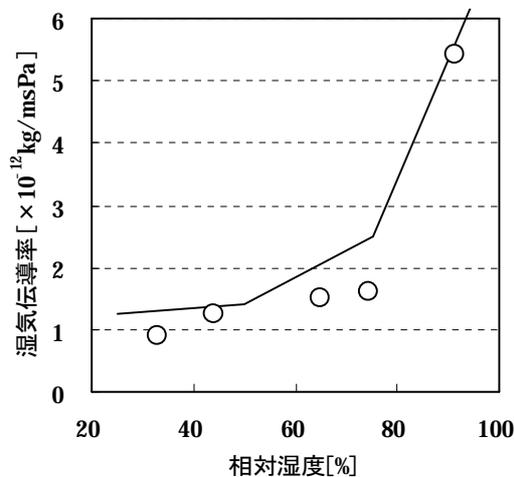
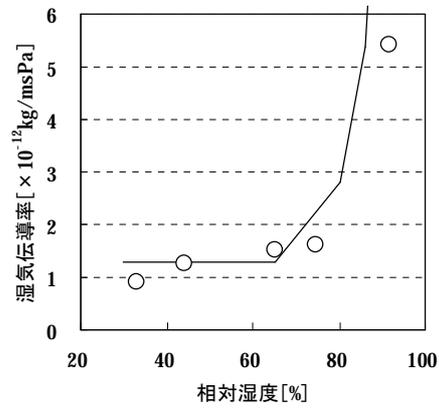
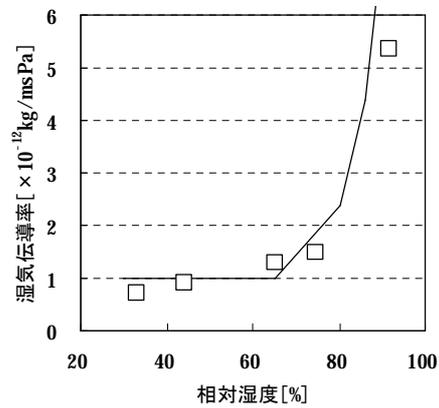


図 3.27 今回の湿気伝導率と文献値との比較 1

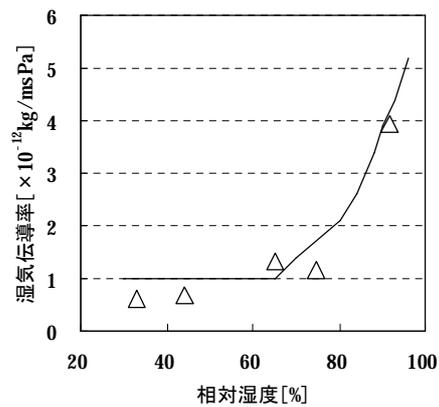
※実線が文献値 [59] を、シンボルが恒温・恒湿槽温度 20°C での今回の Fc27 の結果を示す。
(文献値について、周辺雰囲気温度は 23°C、水セメント比は不明)



(a) 今回の Fc27(水セメント比 54%)の測定結果と水セメント比 60%の文献値との比較



(b) 今回の Fc33(水セメント比 47%)の測定結果と水セメント比 50%の文献値との比較



(c) 今回の Fc40(水セメント比 40%)の測定結果と水セメント比 40%の文献値との比較

図 3.28 今回の湿気伝導率と文献値との比較 2

※実線が文献値 [41] を、シンボルが恒温・恒湿槽温度 20°Cでの今回の結果を示す。
(文献値について、周辺雰囲気温度は不明)

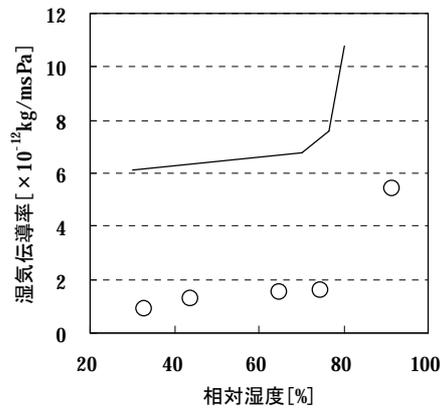


図 3.29 今回の湿気伝導率と文献値との比較 3

※実線が文献値 [60] を、シンボルが恒温・恒湿槽温度 20°Cでの今回の Fc27 の結果を示す。
 (文献値について、周辺雰囲気温度は 23°C、水セメント比は不明)

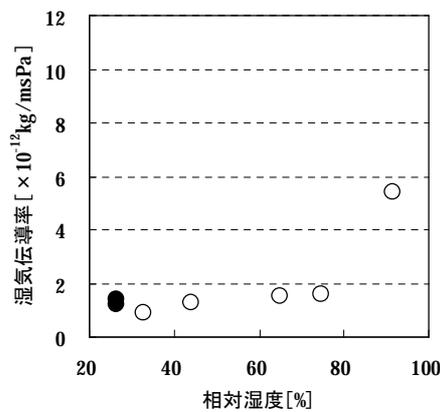


図 3.30 今回の湿気伝導率と文献値との比較 4

※●が文献値 [61] を、シンボルが恒温・恒湿槽温度 20°Cでの今回の Fc27 の結果を示す。
 (文献値について、周辺雰囲気温度は 23°C、水セメント比は不明)

3-7-2 平衡含水率

今回の平衡含水率関係と文献値との比較を図 3.31～図 3.34 に示す。図 3.31 に示すように、文献値 [19] ([58] にも引用) とはかなり異なる結果となっている。これは、測定された時期が古いことから水セメント比がかなり大きいコンクリートと推察でき、近年に用いられているコンクリートと品質が違ふことが理由として考えられる。

測定された年代が新しいその他の文献値 [41]、[62]、[63] と比較すると (図 3.32～図 3.34)、骨材等、コンクリートの使用材料が異なるためか放湿過程の測定値が若干高いが、全般的に類似した結果となっている。

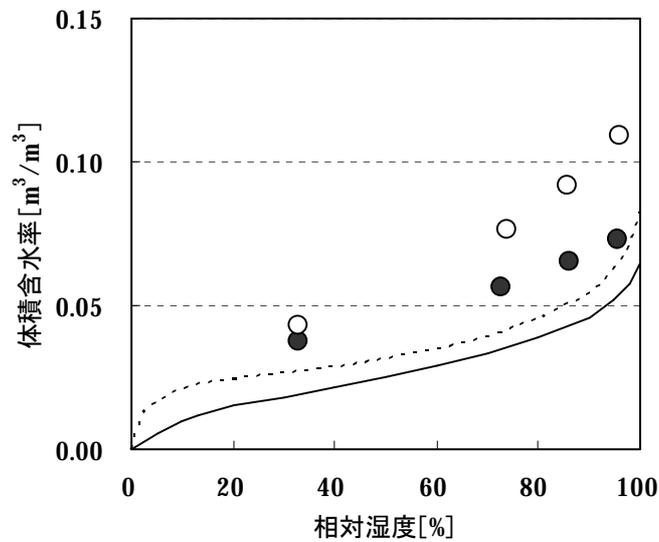
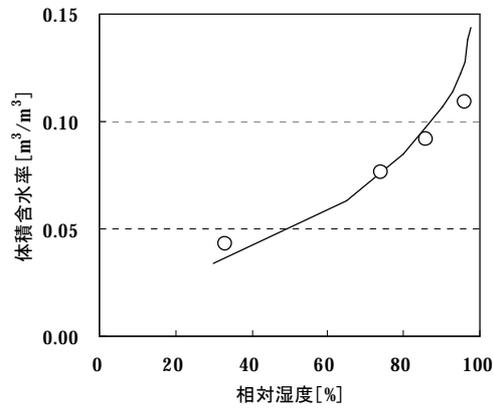
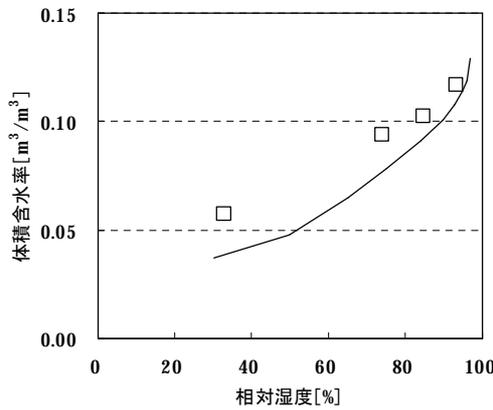


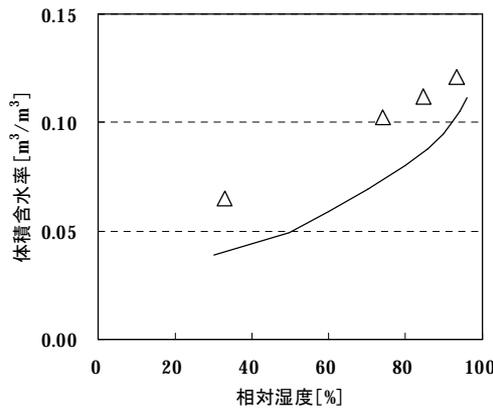
図 3.31 今回の平衡含水率と文献値との比較 1
※ラインが文献値 [19] (実色：吸湿過程、点線：放湿過程) を、
シンボルが今回の Fc27 の結果 (黒色：吸湿過程、白色：放湿過程) を表す。



(a) 今回の Fc27(水セメント比 54%) の測定結果と水セメント比 60% の文献値 (放湿過程) との比較



(b) 今回の Fc33(水セメント比 47%) の測定結果と水セメント比 50% の文献値 (放湿過程) との比較



(c) 今回の Fc40(水セメント比 40%) の測定結果と水セメント比 40% の文献値 (放湿過程) との比較

図 3.32 今回の平衡含水率と文献値との比較 2
 ※実線が文献値 [41] を、シンボルが今回の結果を示す。

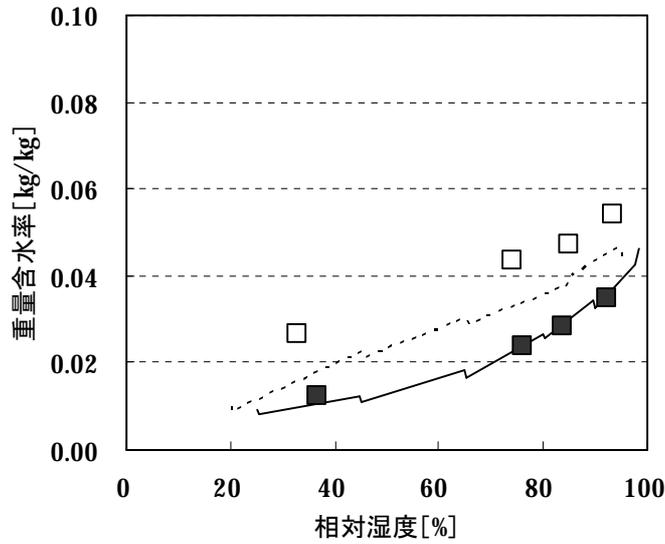


図 3.33 今回の平衡含水率と文献値との比較 3

※実線が文献値 [62] (水セメント比 48%) (実線：吸湿過程、点線：放湿過程) を、シンボルが今回の Fc33 (水セメント比 47%) の結果 (黒色：吸湿過程、白色：放湿過程) を示す。

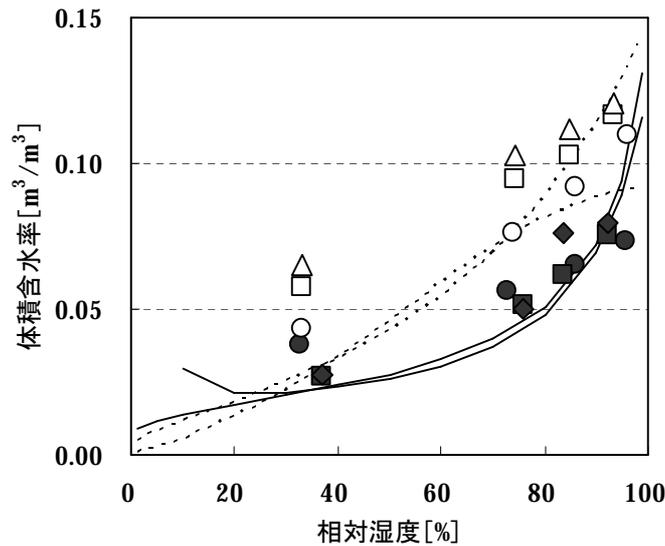


図 3.34 今回の平衡含水率と文献値との比較 4

※実線が文献値 [63] (強度等は不明) (実線：吸湿過程、点線：放湿過程) を、シンボルが今回の結果 (黒色：吸湿過程、白色：放湿過程、○●：Fc27、□■：Fc33、△▲：Fc40) を示す。

3-7-3 透水係数

図 3.35 は、コンクリートの透水係数に関する文献値 [64] を示したものである。これから図示されていない骨材最大寸法 20mm、水セメント比 0.54 (本測定の Fc27 に該当する) の透水係数を内挿すると約 15×10^{-12} ft/s であり、1ft が 0.3048m から約 4.5×10^{-12} m/s となる。今回の測定結果は平均で約 3.0×10^{-11} m/s なので、この文献値よりも 6.7 倍ほど大きい。この理由として試験方法、試験体の大きさ、骨材の量および質 (特に吸水率) の違いが考えられる。

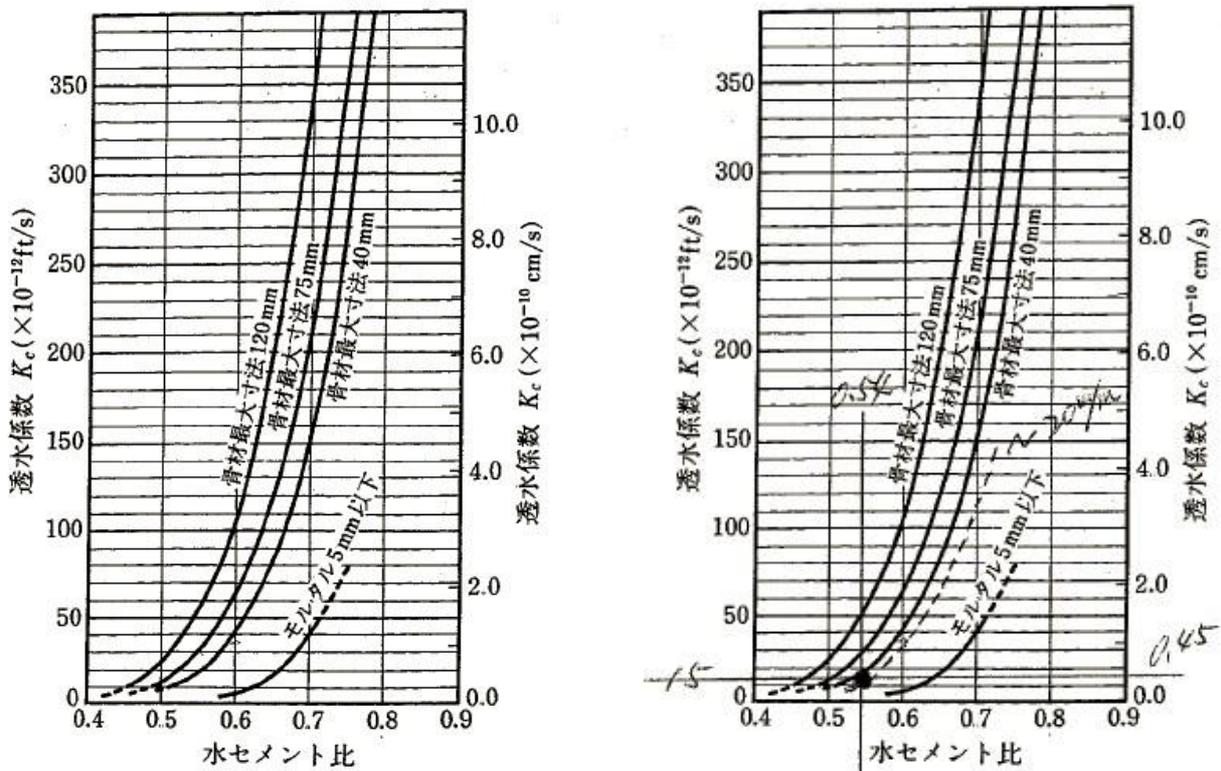


図 3.35 水セメント比とコンクリートの水密性との関係
(左側が原図を転写、右側は Fc27 を推定)

3-7-4 熱伝導率

熱伝導率の測定結果と海外の文献値とを比較したものを表 3.9 と図 3.36 に示す。今回の乾燥時における熱伝導率の測定結果は、材料密度や測定方法および測定時の設定温度差が類似する文献値に近い値となっている（表 3.9 の [67] など）。しかし、図 3.36 のように水分を含んだ場合、今回の測定結果は文献値よりも小さい。この理由として、骨材物性の違い（骨材と熱伝導率との間に弱い相関が見られる：3-6-2 節を参照）、測定時の潜熱の影響（潜熱の影響が大きいほど熱伝導率測定値は大きくなる：3-6-3 節を参照）などが考えられる。

なお、計算に一般的に用いられている国内の文献値（1.3W/mK～1.5W/mK（湿潤：相対湿度 80%））[58] と比較すると、測定結果は近い値を示している。

表 3.9 乾燥時の熱伝導率の今回の測定結果と文献値との比較

	高温側 表面温度 [°C]	低温側 表面温度 [°C]	熱伝導率 [W/mk]	備考
文献値 [59]	—	—	1.16	密度 2270kg/m ³
文献値 [65]	22.4	18.9	2.00	密度 2180kg/m ³ 、 厚さ 90mm、材齢 7 年
文献値 [66]	—	—	1.70	—
文献値 [67] 1	33.81	20.62	1.21	密度 2164kg/m ³
文献値 [67] 2	33.38	20.53	1.26	密度 2146kg/m ³
今回の測定結果（平均値）	27.5	12.5	1.36	密度 2165.7kg/m ³

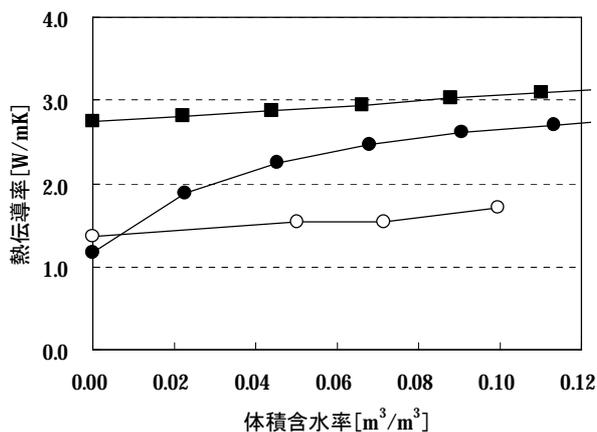


図 3.36 熱伝導率の今回の測定結果と文献値との比較

※●が文献値 [59] (0°C) を、■が文献値 [63] (20°C) を、○が今回の測定結果 (Fc27) を示す。

3-8 本章のまとめ

本章では、強度の異なる3種類のコンクリート（Fc27、Fc33、Fc40）について、湿気伝導率、平衡含水率、透水係数および熱伝導率の測定を行い、ばらつきの程度についても検討した。同時に、測定結果を既往の文献値と比較した。その結果、以下に示す知見が得られた。

(1) 物性値と強度との関係

・湿気伝導率と透水係数は、強度が高くなるほど小さくなる傾向にある。このことは、強度が高いほどセメントペースト内でのセメント粒子間の距離が短くなる（すなわち、毛細管間隙が小さくなる）こと、強度が低いとブリージング水が多くなり、その結果、骨材周辺の遷移帯と呼ばれる連続気泡が増え、水みちも形成されやすいことなどが理由として考えられる。

・平衡含水率については、放湿過程および吸湿過程の相対湿度80%以上の湿度域では強度が高いほど平衡含水率は大きく、逆に、吸湿過程の相対湿度80%以下の湿度域では強度が低いほど平衡含水率が大きくなる傾向が得られた。

・熱伝導率と強度との間には明確な相関が見られず、粗骨材率との間に弱い相関（粗骨材率が高いほど熱伝導率が大きくなる）が見られた。

(2) 物性値と含水率や温度との関係

・どの強度のコンクリートにおいても相対湿度の増加とともに湿気伝導率は大きくなる。特に相対湿度が90%以上で急激に大きくなる。温度を30℃に上げると、湿気伝導率は20℃の場合に比べて低下した。これは比較的低温域であっても気相水分だけではなく液相水分の移動も生じているためと考えられる。

・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る。すなわち、ヒステリシス（履歴）現象が明確に存在する。

・いずれの強度のコンクリートにおいても含水率の増加にともない熱伝導率が大きくなる。これは、含水率の増加によって熱伝導率の小さい空気が熱伝導率の大きい水に置換されるためと考えられる。

(3) 物性値のばらつきの程度と傾向

・本測定では、コンクリートの湿気伝導率は平均値の0.7~1.3倍の範囲の値をとり、高湿度域では

平均に対して最大 $1.0 \times 10^{-12} \text{kg/msPa}$ 程の差が見られる。

- ・コンクリートの平衡含水率は平均値の 0.8~1.2 倍の幅を持ち、高湿度域では平均に対して最大 $0.02 \text{m}^3/\text{m}^3$ 程度の差があった。

- ・コンクリートの透水係数は平均値の 0.5~1.5 倍程度の幅を持ち、平均に対して最大で $1.4 \times 10^{-11} \text{m/s}$ 程の差が生じた。

- ・コンクリートの透水係数は他の水分移動に関する物性値に比べてばらつきが大きい。

- ・コンクリートの透水係数では強度が低いほどばらつきが大きくなる傾向が見られた。

- ・全般的に水分移動に関する物性値のばらつきは強度が低いほど、含水率が高いほど大きい。

- ・コンクリートの熱伝導率は平均値の 0.9~1.1 倍の幅を有する。測定に対する潜熱の影響を考慮すると、高含水条件での熱伝導率は最大でさらに 1.04 倍ほど大きくなる可能性がある。

(4) 既往の文献値との違い

- ・湿気伝導率と平衡含水率については、測定時期が古い文献値と今回の測定値は大きく異なった。これは、近年用いられているコンクリートと品質が違うことが理由として考えられる。測定された年代が比較的新しい海外の文献値と比べると、測定値は比較的良く一致している。

- ・熱伝導率の測定結果は測定方法や材料密度が類似する海外の文献値と比較的良く一致している。また、国内の文献値にも近い。

- ・透水係数の測定結果は文献値よりも大きい。また、含水状態の熱伝導率は海外の文献値よりも小さい。これらの理由として、前者には試験方法や試験体の大きさ、および骨材の違いが、後者には骨材の違いや潜熱の影響が考えられる。

これらのことから、コンクリート壁体について熱水分移動に関する解析を行う際には以下の点に留意すべきである。

- ・熱湿気物性値にはできるだけ使用材料、調合、強度が同一のコンクリートの測定結果を用いる。

- ・熱湿気物性値には強度や温度および含水率による変化を考慮した値を用いる。

- ・最終的な評価は熱湿気物性値のばらつきを考慮して行う。

【本章に関連する発表論文】

- [1.1] 恩村、銚井、松下、小椋、小南、安井：「強度の異なるコンクリートの熱湿気物性に関する研究 熱湿気物性の測定」、日本建築学会環境系論文集、第73巻第625号、pp.299～306、2008.3
- [1.2] Sadayuki Onmura, Shuichi Hokoi, Takayuki Matsushita, Daisuke Ogura, Kazuya Kominami and Yoshitaka Yasui：「A Measurement of Concrete Hygrothermal Properties and the Influence of its Scattering on Hygrothermal Behavior in Concrete Walls」、Second Symposium on Heat-Air-Moisture Transport: Measurement and Implications in Buildings, April 19-20, 2009, Vancouver, B. C. Canada（審査中）
- [2.2] 恩村、松本、銚井、松下、小椋、小南、安井：「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（北海道）、pp.403～404、2004.8
- [2.3] 安井、松本、銚井、松下、恩村、小椋、小南：「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（北海道）、pp.405～406、2004.8
- [2.4] 恩村、銚井、松下、小椋、小南、安井：「鉄筋コンクリート壁の異なる位置における熱・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（近畿）、pp.379～380、2005.9
- [2.5] 安井、銚井、松下、恩村、小椋、小南：「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3 透水係数の測定、気液分離法の提案」、日本建築学会大会学術講演梗概集（近畿）、pp.381～382、2005.9
- [3.1] 恩村、松本、銚井、松下、小椋、小南、安井：「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1 平衡含水率の測定」、平成16年度日本建築学会近畿支部研究報告集、pp.325～328、2004.6
- [3.2] 安井、松本、銚井、松下、恩村、小椋、小南：「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2 熱伝導率、湿気伝導率の測定」、平成16年度日本建築学会近畿支部研究報告集、pp.329～332、2004.6
- [3.3] 恩村、銚井、松下、小椋、小南、安井：「鉄筋コンクリート壁の異なる場所における熱・湿気物性に関する研究 その1 平衡含水率の測定」、平成17年度日本建築学会近畿支部研究報告集、

pp.357～360、2005.6

[3.4] 安井、銚井、松下、恩村、小椋、小南：「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3 透水係数の測定、気液分離法の提案」、平成17年度日本建築学会近畿支部研究報告集、pp.285～288、2005.6

[4.1] 恩村、松本、銚井、松下、小椋、小南、安井：「強度の異なるコンクリートの熱・湿気物性」、日本建築総合試験所「GBRC」第119号、pp.24～32、2005.1

第4章 タイル張り仕上げが施されたコンクリート壁体への水分浸透

4-1 はじめに

コンクリート造の建物、特に集合住宅などは外壁にタイル張り仕上げが施されることが多い。それにより壁体内の水分移動は影響を受けるため、水分の移動に関わる現象を単層壁における結果だけを用いて検討すると、実際とは大きく異なる結論に至る可能性がある。

また、タイルの浮きの発生に水分が果たす役割は大きい[1]、タイル張り仕上げが施されたコンクリート壁体に降雨等の水分がどのように浸透し、内部へ移動していくかについては良く知られていない。

以上のことから、本章では、一般的なタイル張り仕上げが施されたコンクリート壁体における水分移動の挙動を把握するために、試験体を用いた吸水実験を行う。

含水率の測定には、非破壊で含水率測定が可能な γ 線含水率測定装置を用いる。ある γ 線の吸収減衰と透過を利用した測定のため、コンクリート試験体は適切な厚さにしなければならない（厚すぎても薄すぎても測定できない）。そのため、試験体はタイルを張り付けた比較的大きなコンクリート体から切り出す。また、基準となる乾燥時の γ 線透過量が必要となるので、試験体に熱を加えて乾燥させることになる。これらの切断や加熱の際にタイルが剥がれる等の不測の事故が懸念されたので、タイルを張り付けたコンクリート体は多数（14体）用意した。

4-2 試験体

4-2-1 試験体の作成

まず、写真4.1に示すような型枠にコンクリートを流し込んで20.0 cm×30.0 cm×9.0cmの大きさのコンクリート体を作成した。用いたコンクリートの使用材料および調合を、それぞれ表4.1と表4.2に示す。また、品質試験（フレッシュ試験および圧縮強度試験）の結果を表4.3に示す。

表 4.1 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)
細骨材	山砂と砕砂 (混合率 7:3、合成密度 2570kg/m ³)
粗骨材	碎石 (表乾密度 2670kg/m ³)
混和剤	高性能 AE 減水剤、AE 助剤

表 4.2 用いたコンクリートの調合

水セメント比 [%]	単位量 [kg/m ³]				
	セメント	水	細骨材	粗骨材	混和剤
54.0	333	180	846	909	0.7

混和剤の量はセメント量に対する割合 [%]

表 4.3 用いたコンクリートの品質試験結果

試験項目	吸水実験	物性値測定 (第3章)
*スランプ [cm]	19.5	18.3
*スランプフロー [cm]	32.0×30.0	30.6×29.8
*空気量 [%]	6.0	5.5
*温度 [°C]	21	21
4週圧縮強度 [N/mm ²]	27.9	38.6
ヤング係数 [N/mm ²]	2.64×10 ⁴	2.91×10 ⁴

*はフレッシュ試験の結果



写真 4.1 型枠

国内の経済事情の変化により海砂の入手が困難になったため細骨材に山砂を用いたが、その他の材料は第3章の Fc27 における熱湿気物性の測定で用いたコンクリートと同じである。なお、細骨材の違いがコンクリートの品質に及ぼす影響はほとんどない [64]。したがって、フレッシュ試験ではほぼ同様な結果が得られた。しかし、強度については、設計基準強度を満たしてはいるものの熱湿気物性の測定で用いたコンクリートの強度 (38.6N/mm^2) と比べてかなり低い値 (27.9N/mm^2) であった。このことは、後述の解析 (第7章) において考慮する。

コンクリート体は2007年10月19日に作成し、その3日後に脱型した。その後、恒温室内 (20°C) の水槽に投入して4週間水中で養生した。

養生後、コンクリート体にタイルを張り付けた。工法としては図4.1に示す集合住宅などで需要の多い45二丁掛け磁気質タイル ($45\text{mm}\times 95\text{mm}$) を用いた目地幅5mmの薄塗り直張り工法を採用した。実際に現場で行われている手順で施工し、張り付けモルタル、目地モルタルとも既調合の一般製品を用いた。図4.2にタイルの割り付けを示す。

タイル張り施工の1週間後に高速カッターを用いて、タイルを張り付けたコンクリート体を写真4.2に示すように切断し、物性のばらつきを考慮して3体の試験体を取り出した。なお、切断時の振動の影響が考えられたので、できるだけ多くの試験体がコンクリート体から切り出せるように切断位置を決定した。

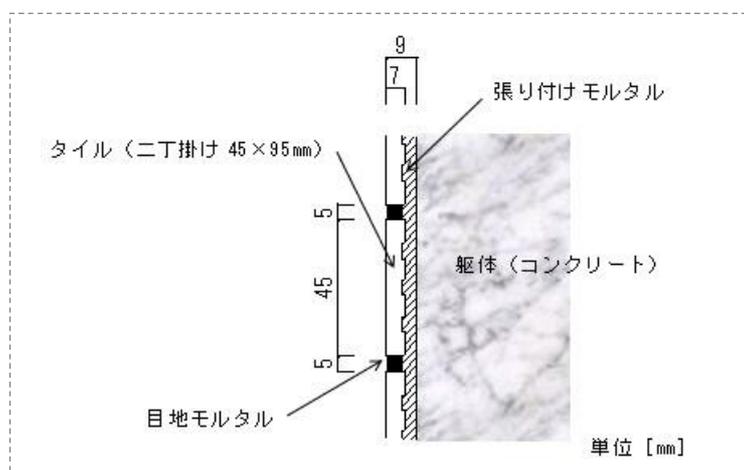


図4.1 薄塗り直張り工法の概要

想定したとおり、切断時にタイルの角とその付近の目地モルタルの表層が少し欠けたが、目視による確認では、割れなどの大きな損傷は見られなかった。また、目視および触診による確認ではあるが、コンクリート部分にも大きな損傷はなく、タイルや目地モルタルも堅固に付着していた。

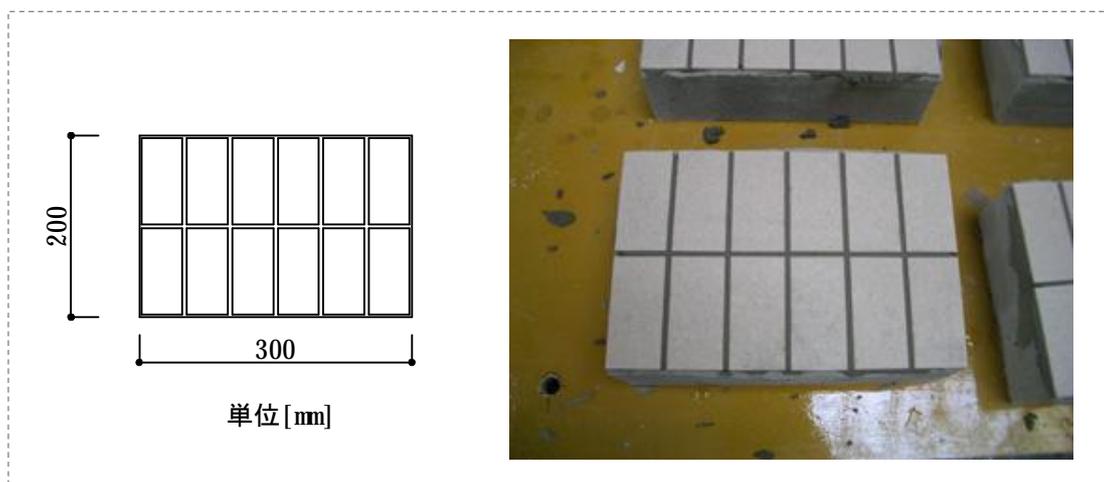


図 4.2 タイルの割り付け

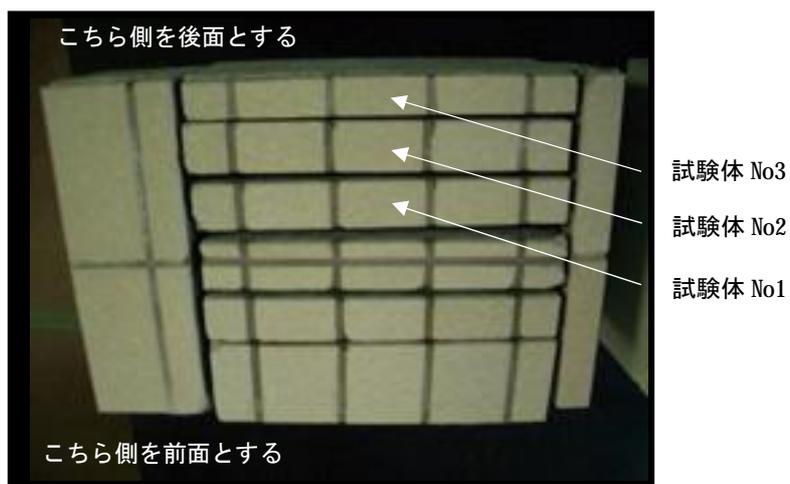


写真 4.2 試験体の切断状況

4-2-2 試験体の諸元

試験体の大きさを図 4.3 に示す。試験体の幅と高さは 198mm×98mm で、各試験体の平均厚さはそれぞれ 24.7mm、26.5mm、22.3mm であり、平均に対するばらつきは試験体 No3 が最も大きく -1.3mm ~ +1.5mm であった。なお、厚さはノギスを用いて測定した。

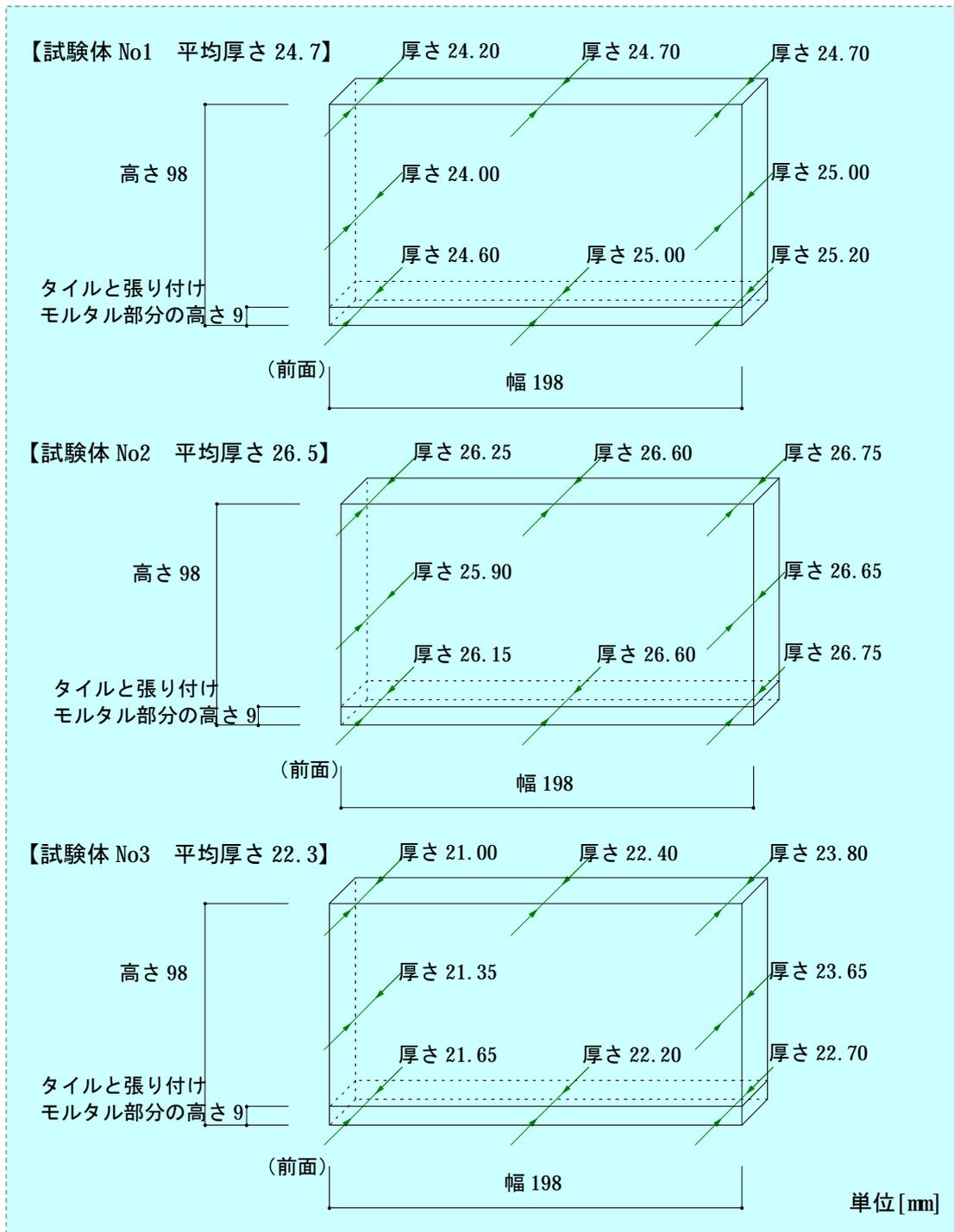


図 4.3 試験体の大きさ

タイルおよび目地部分の欠損状態を図 4.4 に示す。タイルの欠けについては、実験を行う前にシリコン樹脂系のコーキング剤で補修した。目地モルタルの損傷の面積比は最大 5.08% であり、その部分の厚さが他の場所よりも最大で 1mm ほど薄くなるため、多少の影響が現れる可能性があるが、補修が行えないのでそのまま実験に用いた。

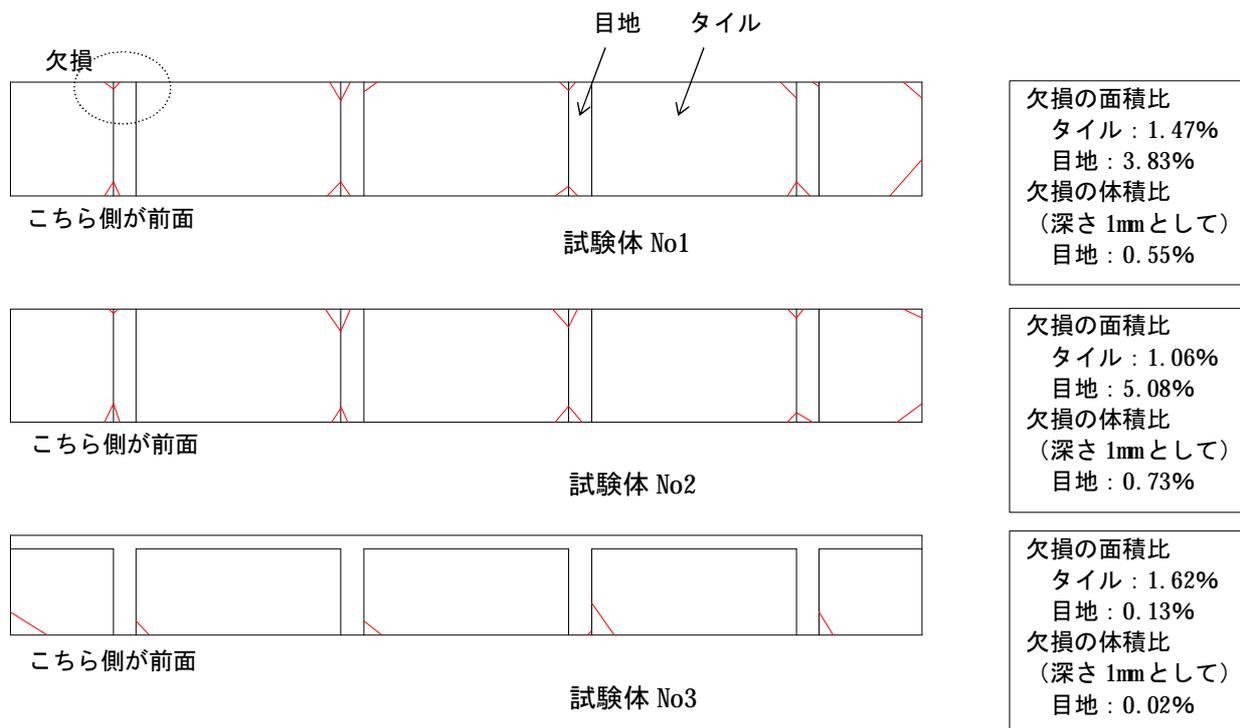


図 4.4 タイルおよび目地部分の欠損状況

4-3 γ 線含水率測定装置を用いた吸水実験

4-3-1 概要

多孔質材料内の含水率は、通常、切断した材料の湿潤時および乾燥時の重量測定結果を用いて算定されるが、コンクリートは細かい切断が容易に行えない。そこで、非破壊での測定が可能な γ 線含水率測定装置を用いて吸水過程における含水率測定を行った [68]。

図 4.5 に示すように γ 線源とディテクターとの間に試料を置く。線源から照射された γ 線は試料を透過する際に内部の水分によって吸収減衰され、透過した γ 線がディテクターでカウントされる。これを γ 線透過量と呼ぶ。体積含水率は、乾燥時と湿潤時の γ 線透過量を用いて、(4.1)式の関係から算定される [68]。

$$I = I_0 e^{-r_w Y b_w d} \quad (4.1)$$

ここで、

d : 試料の厚さ [m]、 I : 体積含水率 Y のときの試料の γ 線透過量 [cps]、 I_0 : 乾燥時の試料の γ 線透過量 [cps]、 r_w : 水密度 [kg/m^3]、 b_w : 水の質量吸収係数 [m^2/kg]、 Y : 試料の体積含水率 [m^3/m^3]

※cps は 1 秒間当たりの計数 (counts per second) を表す。

※今回の測定では線源に Am241 (アメリシウム) を用いた。水の質量吸収係数は 0.02059 である。

γ 線源とディテクターは同期して上下、左右に移動し、試料の任意の位置における体積含水率の測定が可能である。

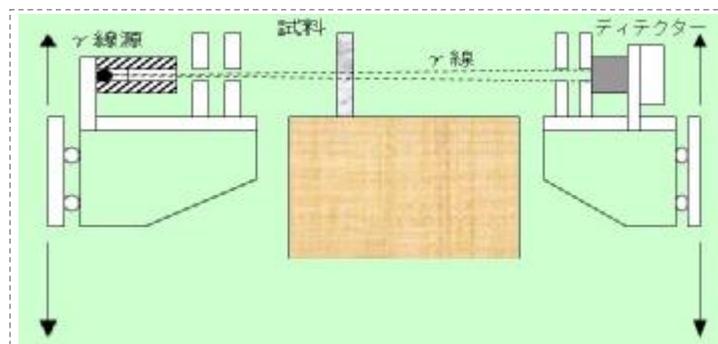


図 4.5 γ 線含水率測定装置の概要

まず、側面をエポキシ系接着剤とアルミ箔によって断湿した試験体を 105°C で 4 日間乾燥させる。その後、タイル面を下にして取付け治具に試験体を設置し、下部の水槽に水が無い状態で γ 線透過量を測定した。このとき、 γ 線の照射方向は厚さ方向で、照射は前面（写真 4.2 を参照）から行った。これより以降の本論における姿図はすべて前面から見たものである。

測定位置を図 4.6 に示す。測定点数は、垂直方向が 5mm 間隔の 15 点で、水平方向が 25mm 間隔の 7 点、計 105 点である。1 点あたりの測定時間は 50 秒とした。なお、目視による確認ではあるが、乾燥後の試験体はコンクリート、目地、タイル、断湿材とも、変化が見られなかった。

次に水槽に脱気した蒸留水を入れ、3 時間毎に 480 時間（20 日）後まで γ 線透過量を測定した。このとき、試験体の水没深さは最大で 5mm とした。

周辺雰囲気温度と湿度は、試験体の上部 2 点と側部 2 点に設置した温湿度センサー（おんどとり）を用いて測定した。試験体側面の温度も熱電対を用いて試験体の上端から 10mm、35mm、60mm の位置の 3 点で測定した（写真 4.3 を参照）。

実験は温度制御が可能な室で行い、湿度の制御は行っていない。なお、試験体の上面は断湿していないので、湿気は自由に吸湿または放湿される。実験中、水面での蒸発や試験体の吸水によって蒸留水の水位が徐々に減少していくが、それは随時給水を行うことで調節した。また、蒸留水を入れた直後はタイル面（吸水面）に気泡が生じたので、ブラシを用いて除去した。その後、写真 4.4 に示すように実験終了まで給水時においても気泡は見られなかった。

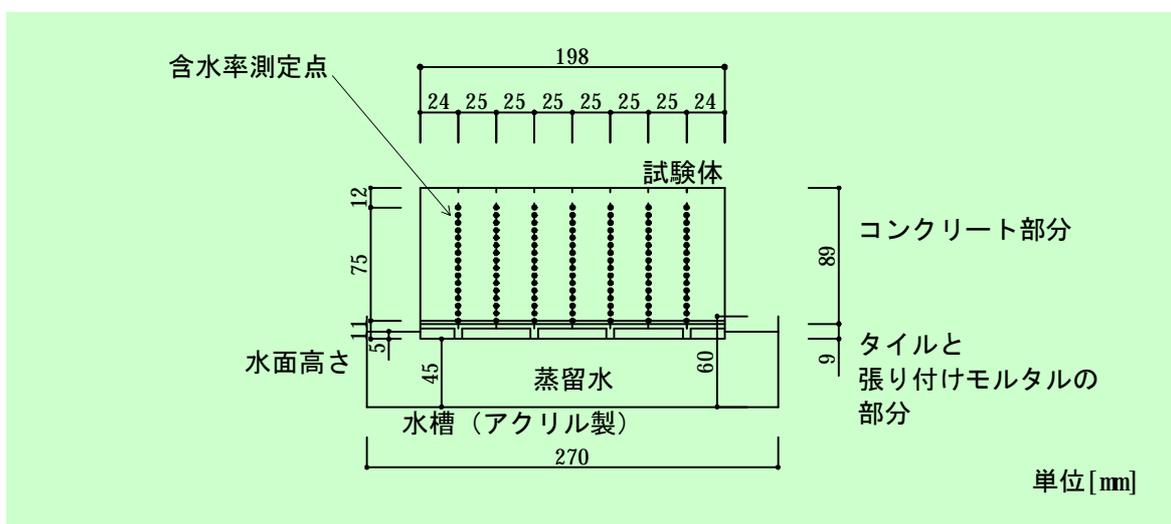


図 4.6 試験体設置状況と含水率の測定位置

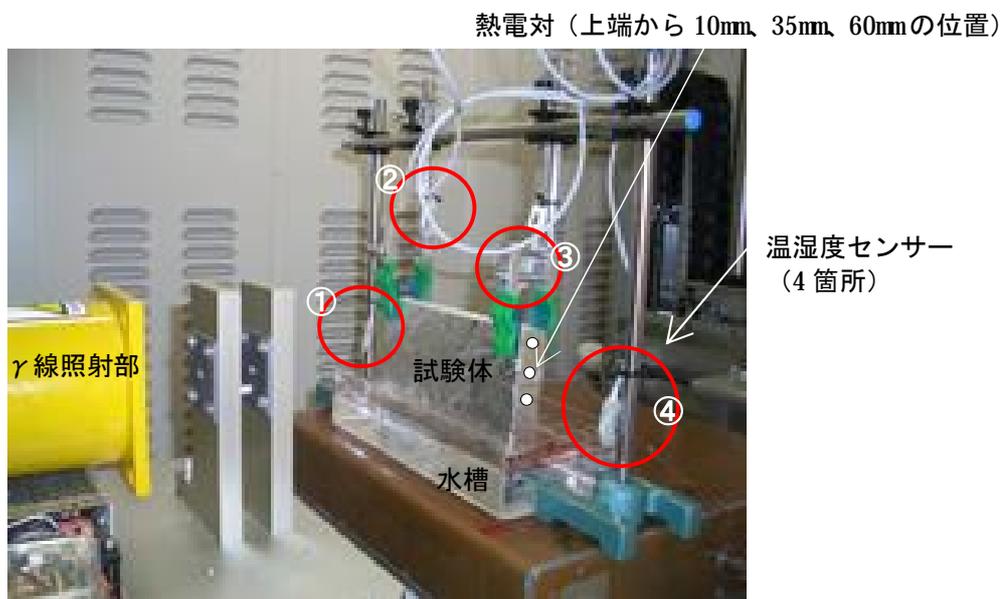


写真 4.3 試験体設置状況と温湿度の測定位置



写真 4.4 試験体設置状況（吸水面の様子）

4-3-2 測定結果と考察

(1) 周辺雰囲気温度および試験体の温度

実験中における周辺雰囲気温度および相対湿度の測定結果を図 4.7 と図 4.8 に示す。

水分移動に対する温度変動による影響を排除するために、室内の温度制御を備え付けの空調機で行った。図 4.7 の 1 月 30 日や 2 月 15 日前後の測定結果から、空調機器が順調に稼働したならば、室温は $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 程度の変動内で一定に制御できたと考えられる。しかし、空調システムの不調により、たびたび電源が切れることがあったため、その間の室温は変動した。ただし、変動幅は $\pm 3^{\circ}\text{C}$ 程度である。

室温の変動に対応して相対湿度も変動した。変動幅は若干大きく $\pm 10\%$ 程度である。

これら、周辺雰囲気温度および相対湿度の変動は試験体内の水分移動に影響すると考えられる。しかし、同時刻における各点の測定結果の差は、温度が平均で 0.2°C 、相対湿度が平均で 2.0% であり、同時刻の周辺雰囲気との間には大きな温度差や湿度差はなかったと言える。

また、図 4.9 は試験体側面温度の測定値を周辺雰囲気温度の平均値とともに示したものであるが、試験体側面の温度は周辺雰囲気温度と同様の変動を示し、その差の平均は 0.2°C 以下であった。さらに、試験体の上端から 10mm、35mm、60mm の位置で温度を測定したが、それらの温度差の平均は 0.4°C 以下であった。なお、位置の違いによる温度の大小関係に特別な傾向は見られなかった。

以上から、実験中の温度変動が試験体内の水分移動に及ぼす影響は大きくはないと考えられる。また、湿度変動の影響も断湿していない試験体上面に限られ、吸水面での影響はほとんどないと考えられる。

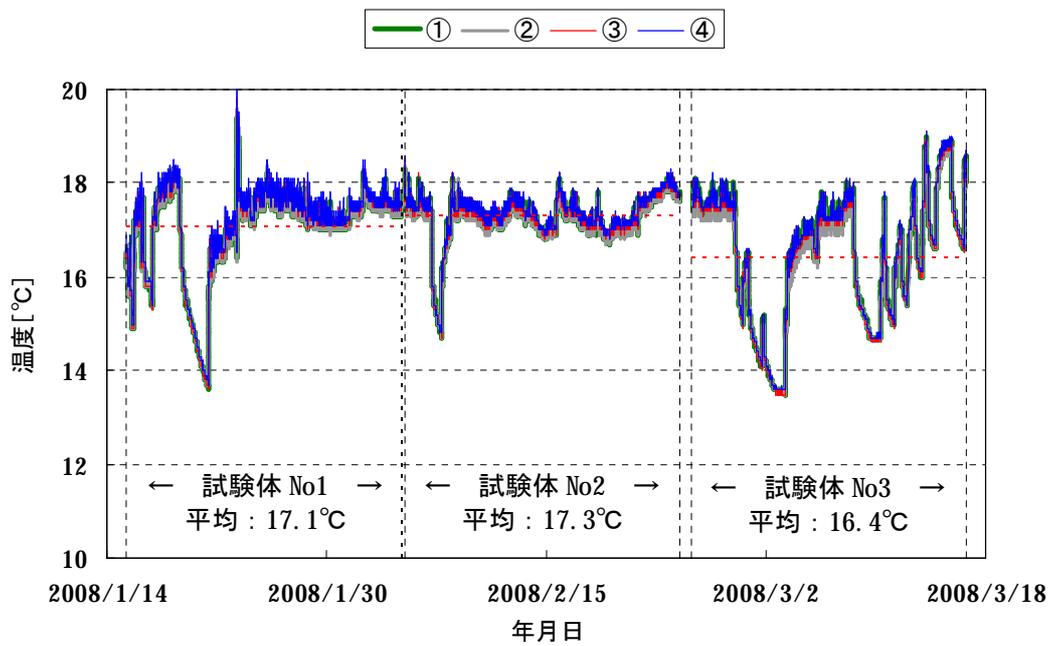


図 4.7 実験中における周辺雰囲気温度
 ※測定位置①、②、③、④は写真 4.3 を参照。

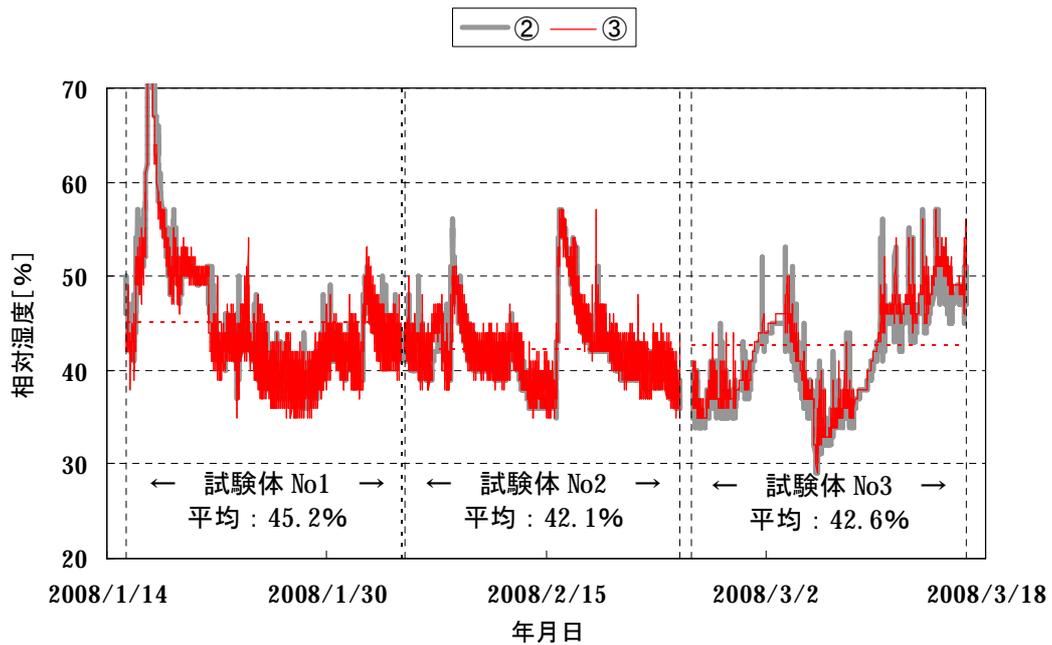
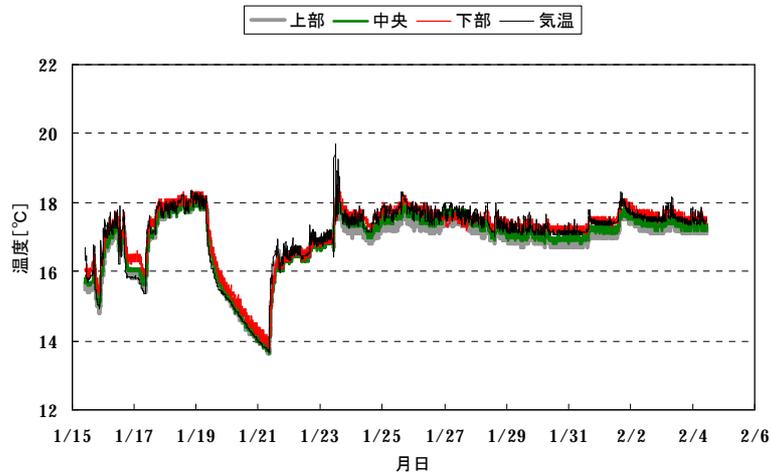
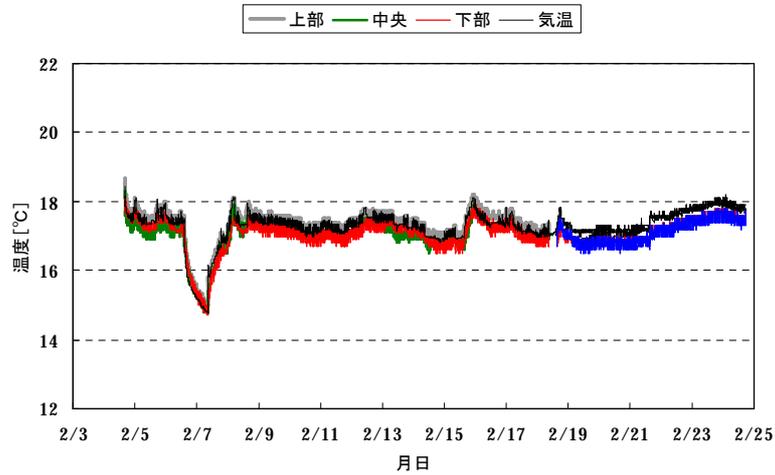


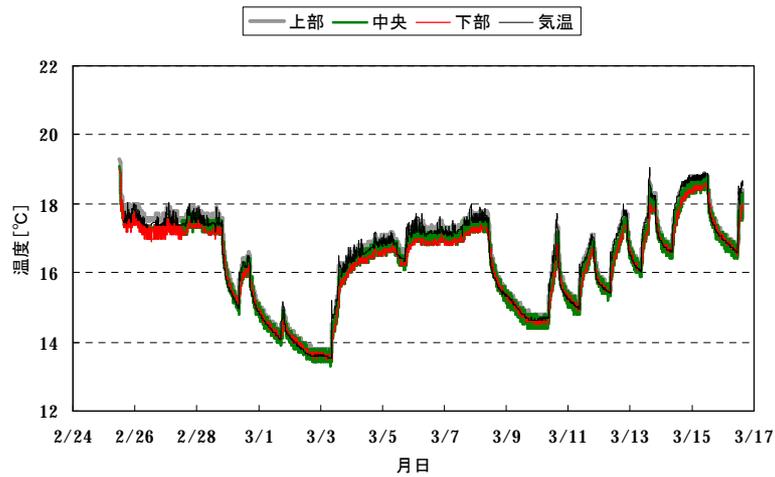
図 4.8 実験中における周辺雰囲気相対湿度
 ※測定位置②、③は写真 4.3 を参照。



(a) 試験体 No1



(b) 試験体 No2



(c) 試験体 No3

図 4.9 実験中における試験体側面の温度

※凡例の上部、中央、下部は、それぞれ試験体の上端から 10mm、35mm、60mm の位置を示す (写真 4.3 を参照)。

(2) 試験体の体積含水率の経時変化

試験体 No1 の吸水面からの高さ 11mm、16mm、26mm、36mm、46mm、56mm、71mm、81mm における体積含水率の経時変化を図 4.10 に示す（すべての結果は付録 A-1、p195～に示す）。

h は鉛直方向の位置を、①～⑦は水平方向の位置を表す。線のみが表示が目地の位置（①、③、⑤、⑦）、線と記号での表示がタイル中央の位置（②、④、⑥）に当たる。また、給水を行ったタイミングも図示している。

測定結果には最大で $\pm 0.02\text{m}^3/\text{m}^3$ 程度の変動が見られた。試験体を設置していない状態でも γ 線のカウンタ値には平均に対して $\pm 0.6\%$ 程度のばらつきがある（ $\pm 100\text{cps}$ 程度）。それが透過量にも影響しており、今回の測定では γ 線の照射が安定する測定後半のデータを用いているが、それでも平均に対して $\pm 10\text{cps}$ ～ $\pm 40\text{cps}$ のばらつきがあった。コンクリートのように γ 線を透過しにくい材料では、この透過量のばらつきが含水率に換算する過程で大きくなってしまうため、それが変動として現れたと考えられる。例えば、厚さ 25mm のコンクリートの場合、乾燥時の γ 線透過量は 3000cps 程度である（何もない状態では 18000cps 程度）。含水率が $0.1\text{m}^3/\text{m}^3$ の場合、そのときの γ 線透過量は 2850cps となる。これが 2870cps と 20cps だけ大きかったとすると、含水率は $0.014\text{m}^3/\text{m}^3$ 低下する。一方、乾燥時の γ 線透過量が 9000cps の材料を考えると、同じ 20cps の誤差は含水率の低下にして $0.005\text{m}^3/\text{m}^3$ にしかない。

そこで、測定装置に由来すると考えられる変動を除去するために、時間平均（5 点すなわち 15 時間の平均）を用いて測定結果を整理した。なお、 $0\text{m}^3/\text{m}^3$ 以下の測定値は $0\text{m}^3/\text{m}^3$ とした。

図 4.10 (a) から、試験体 No1 の目地①、⑤、⑦の含水率は、吸水開始からすぐに上昇しており、目地③の含水率は、吸水開始から 20 時間ほど遅れて上昇している。含水率の変化から、吸水量は目地によって異なり、①>③>⑦>⑤の順に多いように思われる。しかし、吸水部位から遠いタイル中央②の含水率が目地①と同様に吸水開始からすぐに急上昇していること、目地③の含水率の上昇に時間遅れが見られること等から、目地③での含水率の上昇は、その場所での吸水よりも目地①から吸水された水が水平方向へ移動したことによる影響の方が大きいと考えられる。

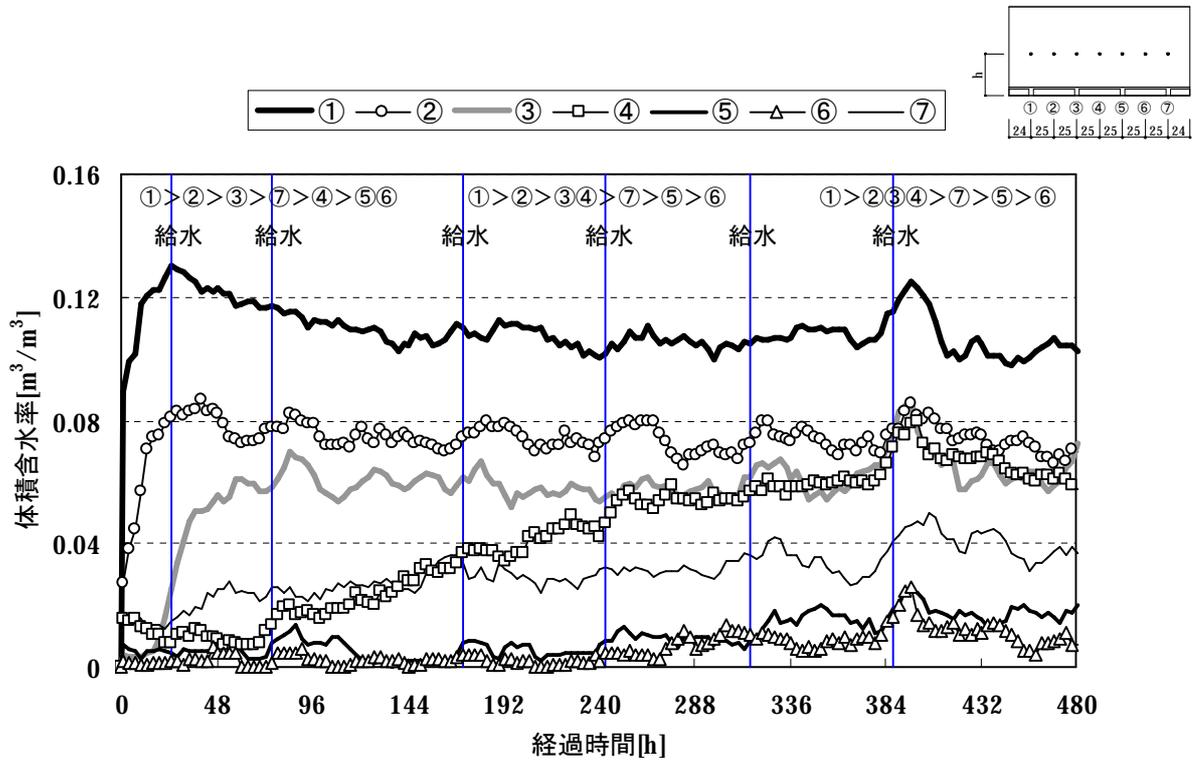
タイル中央④の含水率は時間の経過とともに緩やかに上昇し、その大きさは目地⑤の含水率よりも大きい。このことから、目地①で吸水された水分の水平方向への移動の影響は広範囲に（④にまで）及んでいると考えられる。

タイル中央⑥の含水率の変化傾向は、目地⑦の含水率よりも目地⑤の含水率の変化傾向に近い。よって、⑥の含水率の上昇は目地⑤で吸水された水分の水平方向への移動によるものと考えられる。

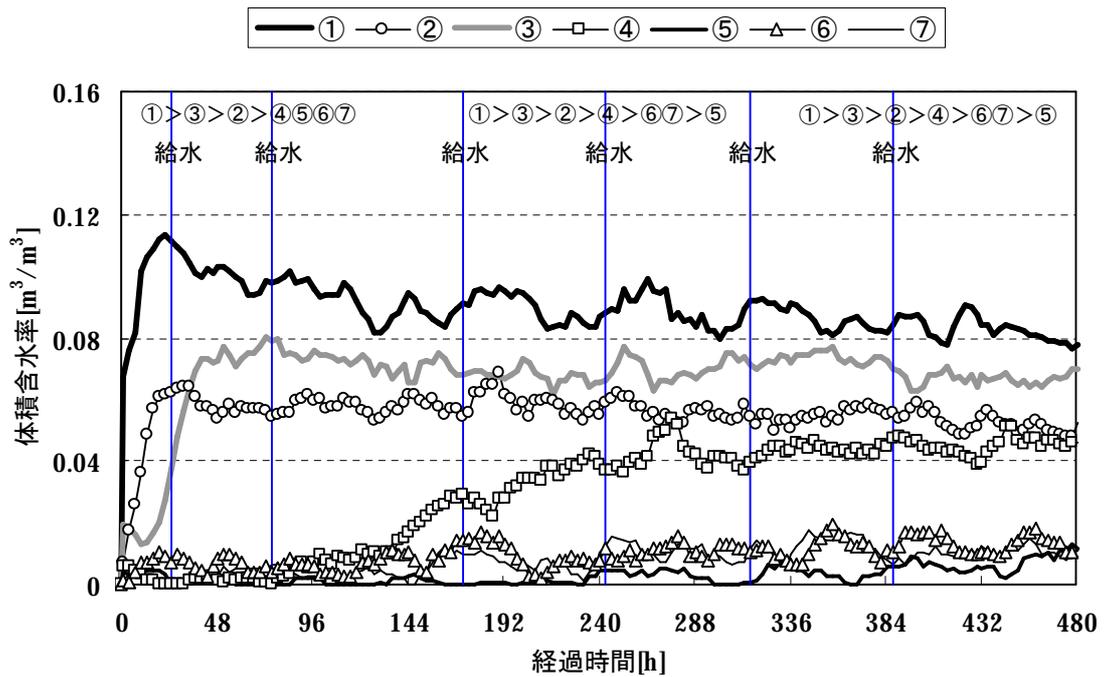
以上をまとめると、目地での吸水量は①>>⑦>⑤の順に多く（③の吸水量の大小は判断しにくい）、吸水面からの高さ 11mm の位置での水平方向の水分移動は①→②→③→④>>⑤→⑥>⑦→⑥の順に多いと推察される。

図 4.10 (b) ～図 4.10 (o) を見ると、吸水面からの位置が高くなるほど含水率が低くなる傾向にある。このことから、鉛直方向へ水分が移動していることが分かる。ただし、含水率の上昇傾向は一様ではない。含水率の大きい試験体の左側（①～④）に注目すると、ほとんどの位置で含水率の大きさは①>②>③>④の順であるが、吸水面から 16mm、46mm の位置では①>③>②>④の順になり、81mm の位置では②>①>③>④の順になっている（付録 A-1 も参照）。

また、吸水面からの高さ 46mm の位置（図 4.10 (h)）では、他の高さでは含水率の大きい②での含水率が極端に小さくなっている。さらに、高さによっては吸水部位から遠いタイル中央⑥の含水率が吸水部位に近い目地位置⑤や⑦の含水率よりも大きいという結果も見られる。

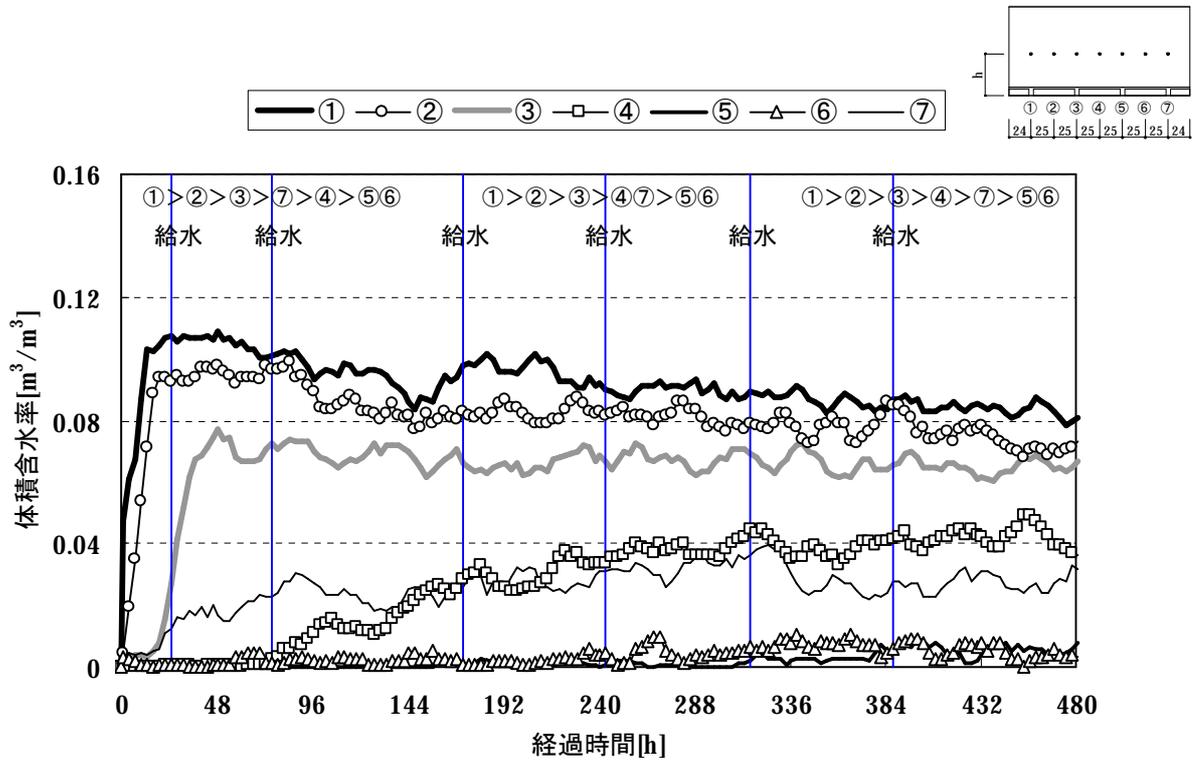


(a) h=11mm

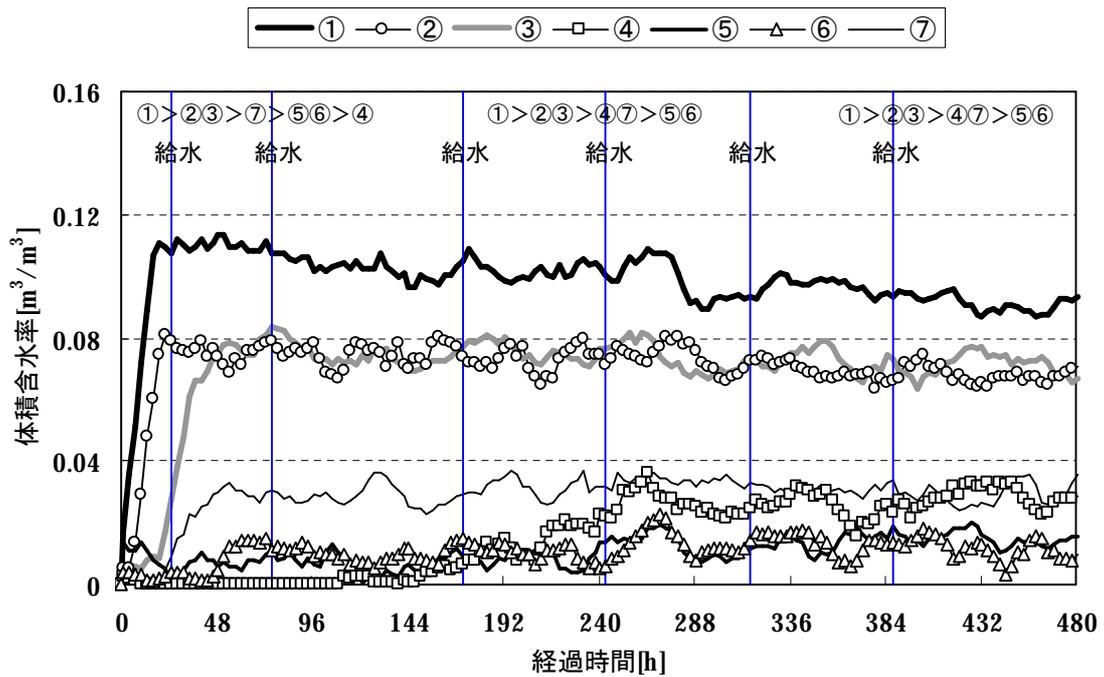


(b) h=16mm

図 4.10 体積含水率の経時変動 (試験体 No1)

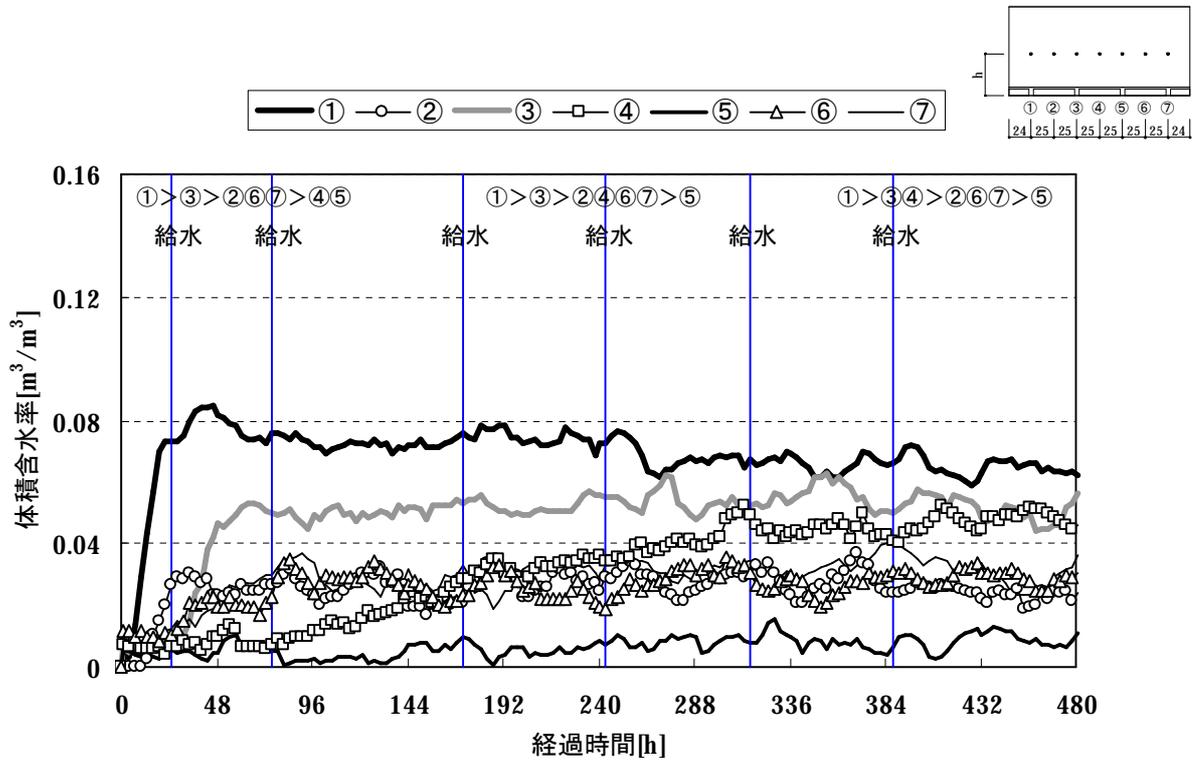


(d) $h=26\text{mm}$

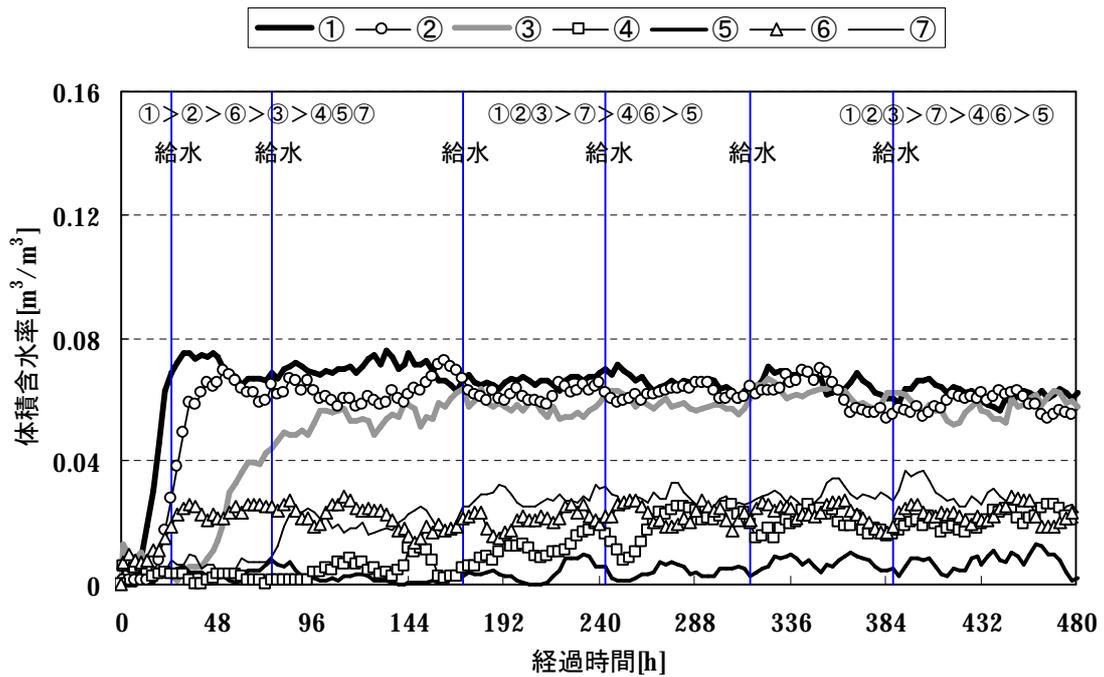


(f) $h=36\text{mm}$

図 4.10 体積含水率の経時変動 (試験体 No1)

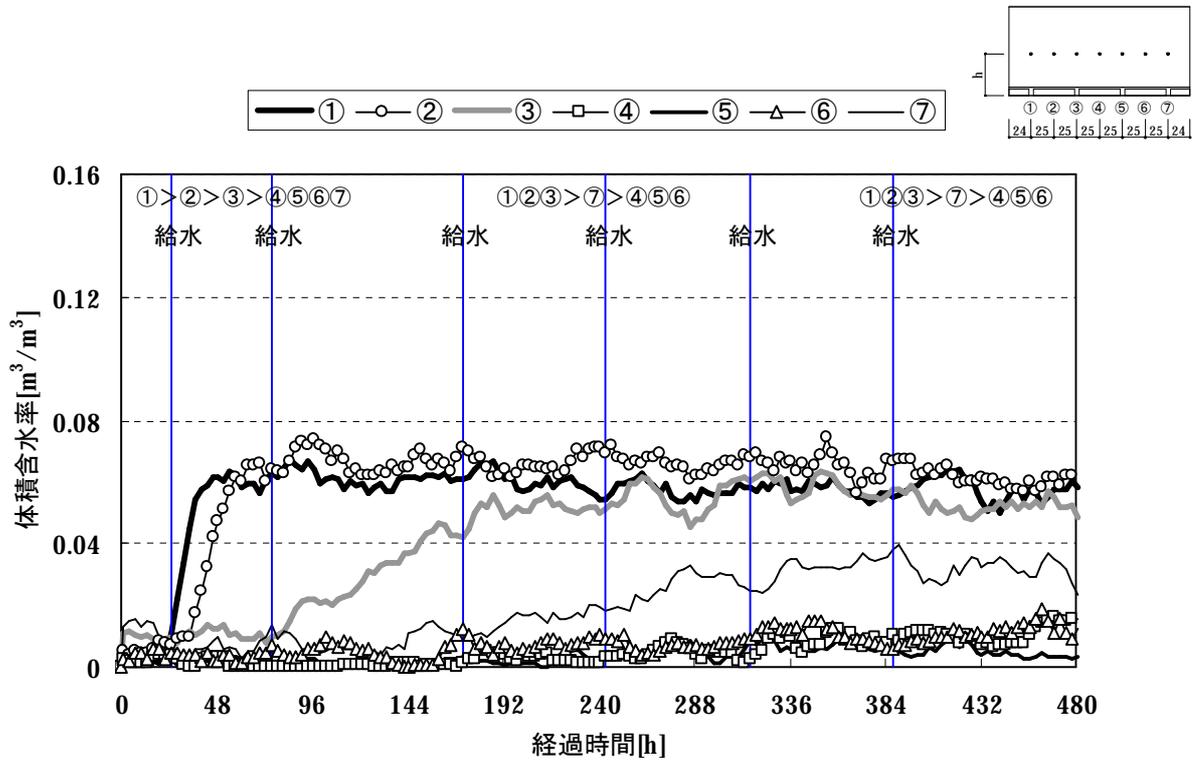


(h) h=46mm

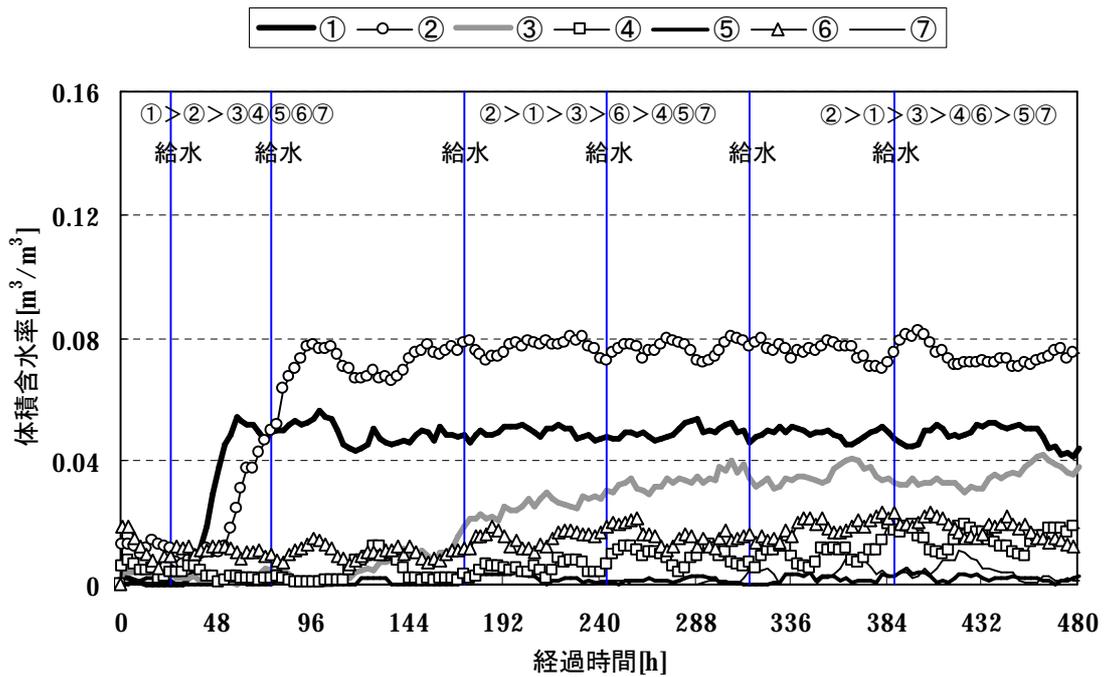


(j) h=56mm

図 4.10 体積含水率の経時変動 (試験体 No1)



(m) $h=71\text{mm}$



(i) $h=81\text{mm}$

図 4.10 体積含水率の経時変動 (試験体 No1)

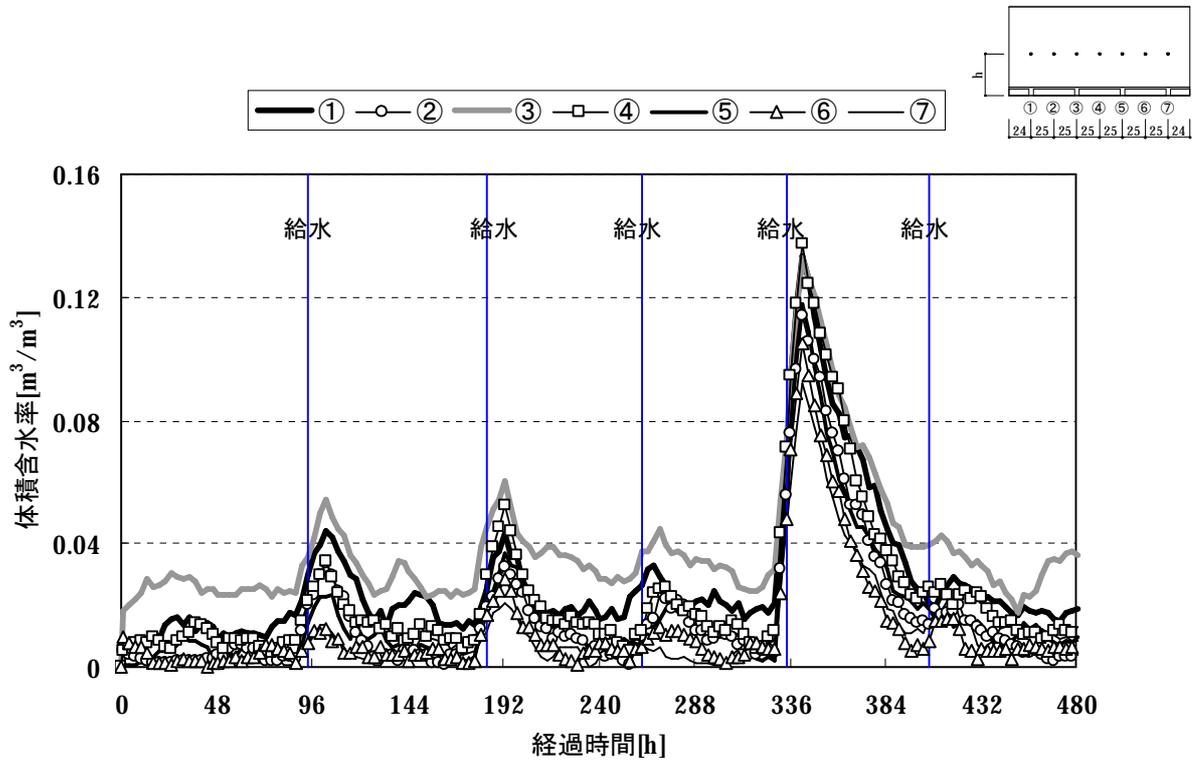
試験体 No2 の体積含水率の経時変化を図 4.11 に示す。

図 4.11 (a) では、給水後に含水率が急激に上昇し、その後減少している時間帯がある。これは給水時に水位を誤ったためで、その影響で含水率が上昇し(γ線が水によりいくらか吸収されてしまった)、蒸発による水面位置の降下にもなって含水率が減少したと考えられる。以後、含水率が急激に変化しているこの部分は考察に含めない。

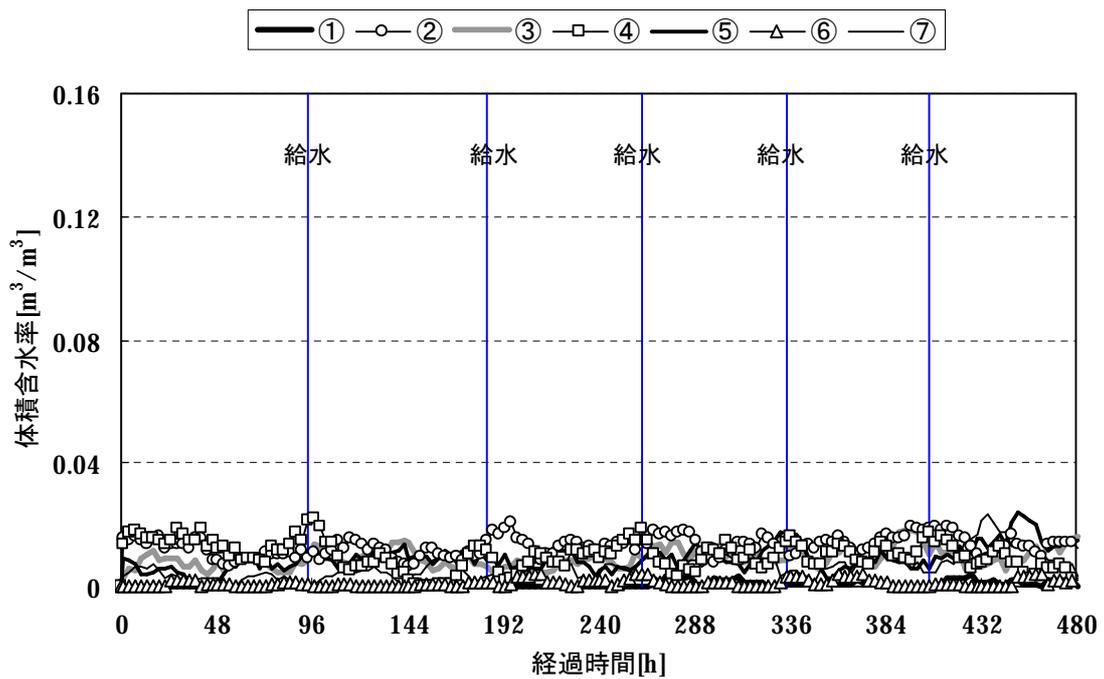
目地①、③、⑤、⑦の含水率は、少量ではあるが吸水開始からすぐに上昇している。すなわち、すべての目地で吸水がなされたと言える。試験体 No1 と同様に目地からの吸水量は位置によって異なり、含水率の大きさから、③>①>⑤⑦の順に多い。ただし、試験体 No1 と比べると吸水量はかなり少ない。

タイル中央②、④、⑥の含水率もかなり低い。しかし、0 ではないので、少量ではあるが水平方向の水分移動があったと考えられる。

図 4.11 (b) に示す吸水面からの高さが 16mm での含水率は、どの位置(①~⑦)も低く、上昇傾向が見られない。図示していないが、吸水面からの高さが 16mm 以上の測定結果では、含水率に大きな変化が見られなかった。よって、試験体 No2 の場合、鉛直方向への水分移動は極めて少量であったと言える。



(a) h=11mm



(b) h=16mm

図 4.11 体積含水率の経時変動 (試験体 No2)

試験体 No3 の吸水面からの高さ 11mm、16mm、26mm、36mm、46mm、51mm における体積含水率の経時変化を図 4.12 に示す（すべての結果（ただし、吸水面からの高さが 51mm より上のは除く）は付録 A-2、p203～に示す）。

図 4.12 (a) に示すように、試験体 No3 も試験体 No2 と同様に目地①、③、⑤、⑦の含水率が吸水開始からすぐに上昇しており、すべての目地で吸水がなされたと言える。しかしながら、吸水開始直後に上昇した含水率はその後 50～60 時間ほど増加がなく、増加はそれ以降に見られる。

吸水量は目地の位置によって異なり、含水率の大きさから、③>①>⑤>⑦の順に多い。

タイル中央②の含水率は、吸水開始からやや遅れて上昇しているのも、目地①または目地③から吸水された水分の水平方向への移動によるものと思われるが、初期には目地①や目地③よりも含水率が高く、時間が経つと低くなっている。

タイル中央④および⑥の含水率の変化傾向は、目地⑦の含水率の変化傾向に近い。特に④は、吸水量の多い目地③の近傍であるにもかかわらず含水率が低い。このことから、目地③から④および目地⑤から④への水分移動は少なく、目地⑤から⑥への水分移動と目地⑦から⑥への水分移動を比較した場合、後者の方が多かったと言える。

鉛直方向への水分移動を見ると（図 4.12 (b)～図 4.12 (i)）、吸水面からの高さが 16mm～26mm における目地①の含水率はほとんど 0 である。ところが、吸水面からの高さが 36mm までの含水率の変化を見ると、タイル中央②と目地③において、鉛直方向への水分移動が確認できる。これらの現象から、目地①から吸水された水分は、鉛直方向に移動せずに水平方向（②の方向）へ移動し、また、目地③から吸水された水分も鉛直方向よりも水平方向（②の方向）へ移動する量が多かったため、②の含水率が特に大きくなったと推察される。この目地①で見られた鉛直方向への水分移動を抑制した要因としては骨材の影響が考えられる。

その他の位置（①、④、⑤、⑥、⑦）での鉛直方向への水分移動は極めて少量であり、図示していないが、吸水面からの高さが 51mm 以上の位置では、含水率に大きな変化が見られなかった。

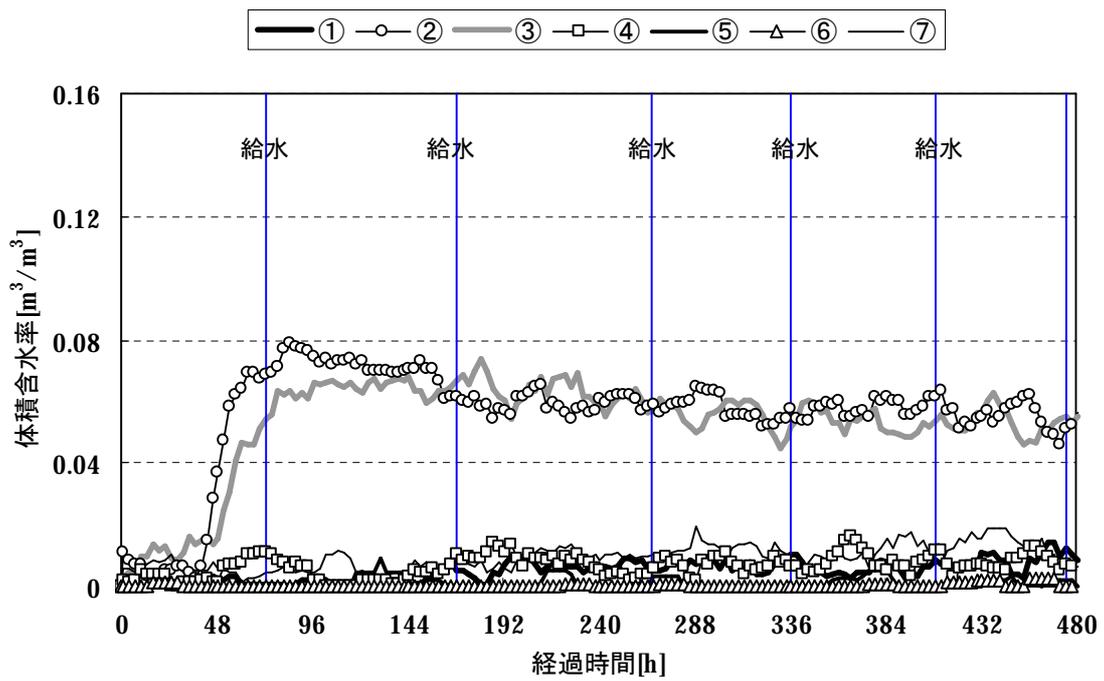
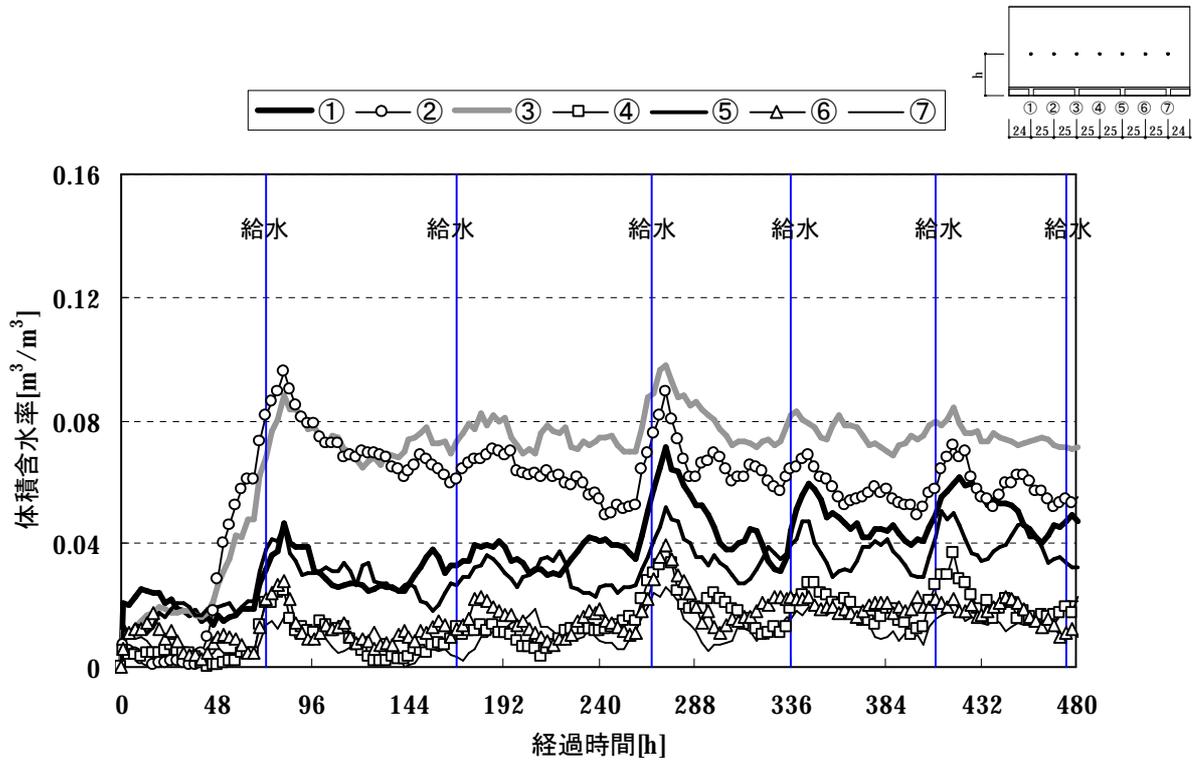
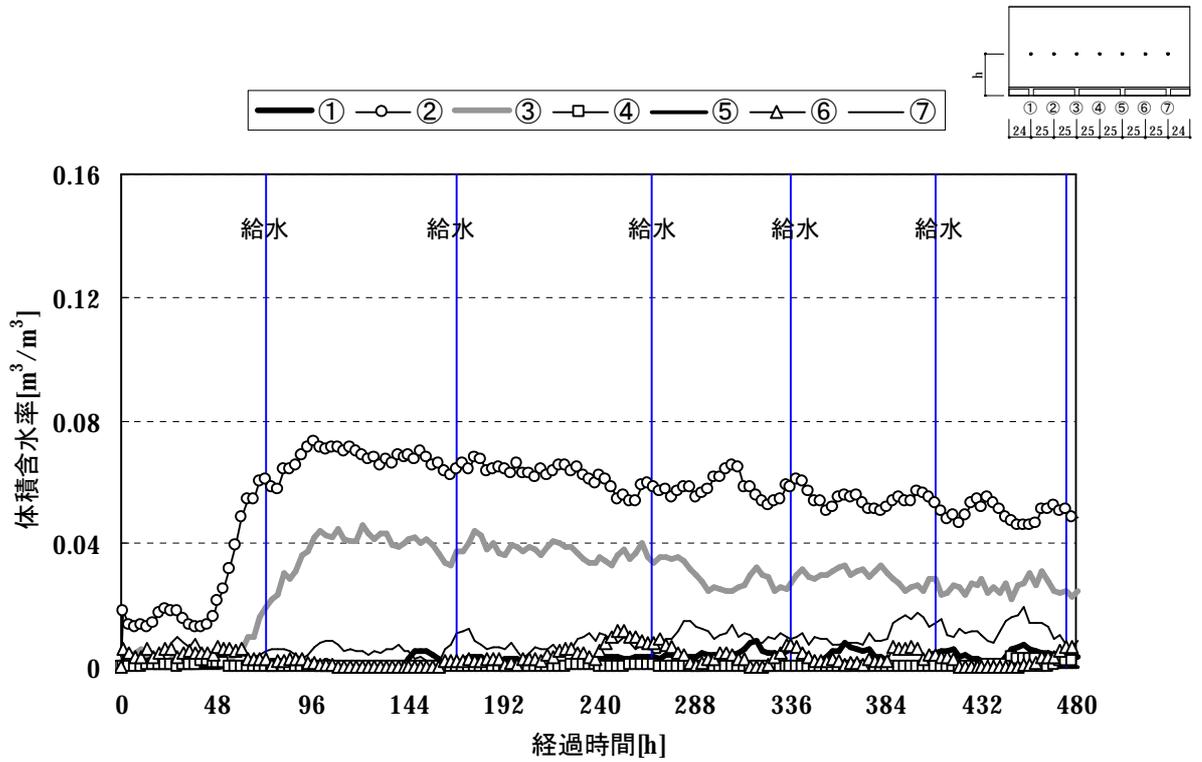
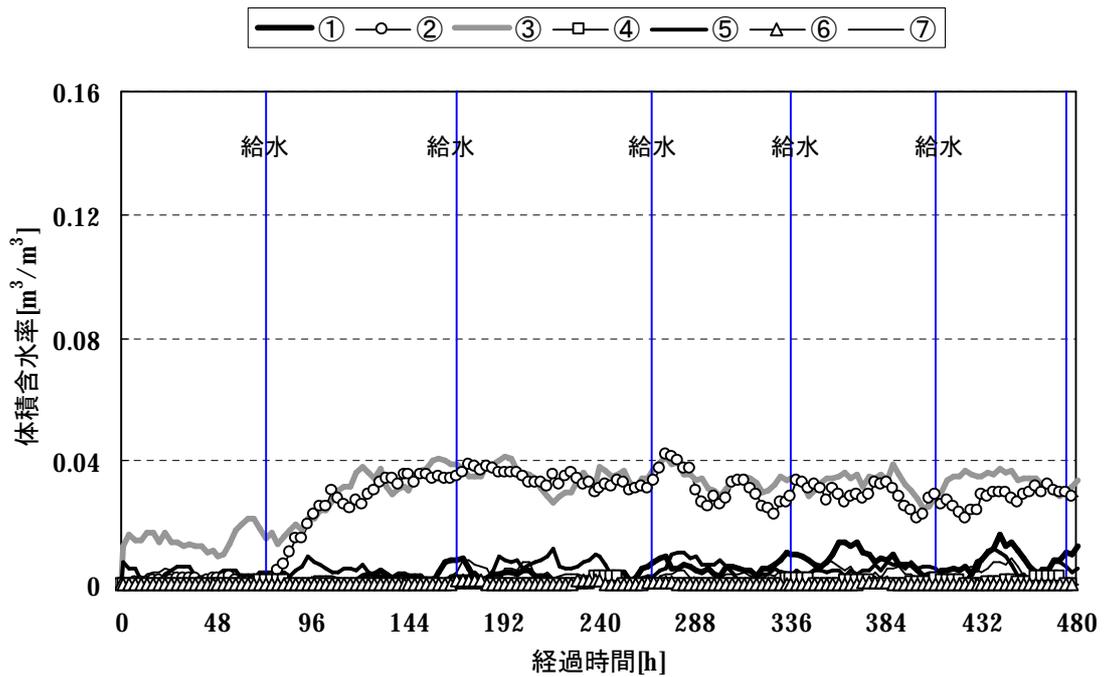


図 4.12 体積含水率の経時変動 (試験体 No3)

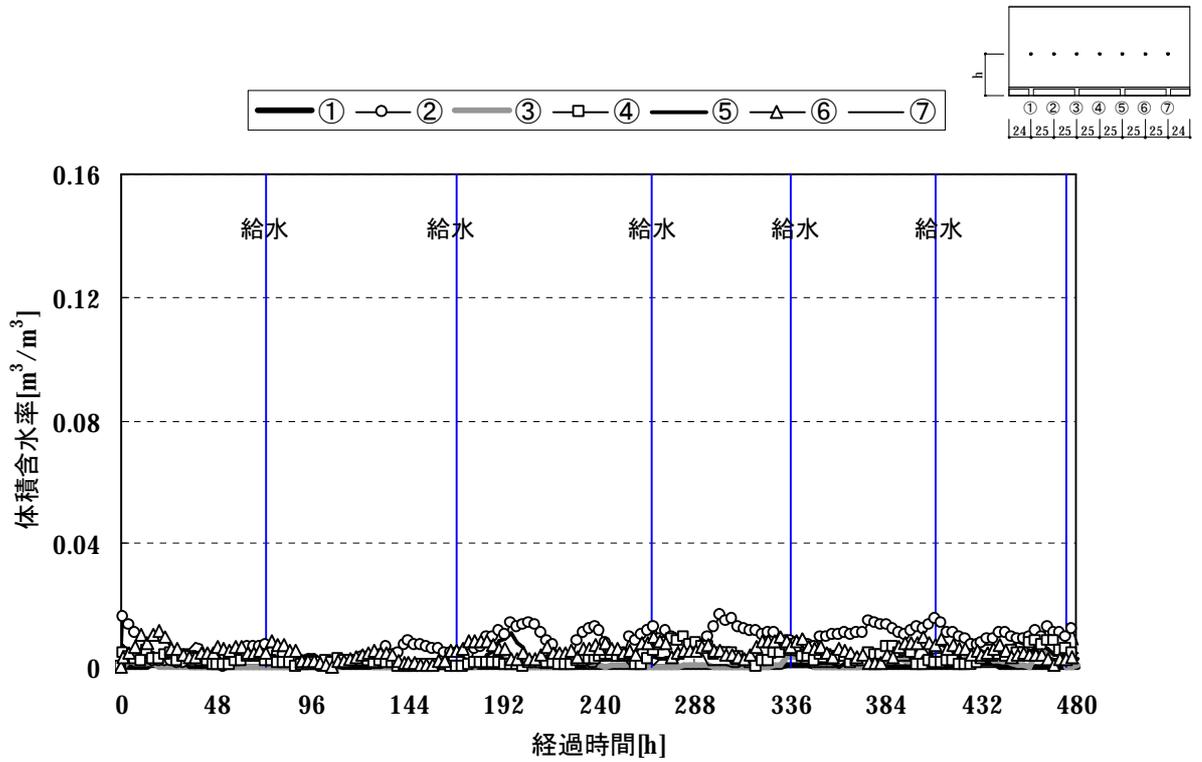


(d) $h=26\text{mm}$

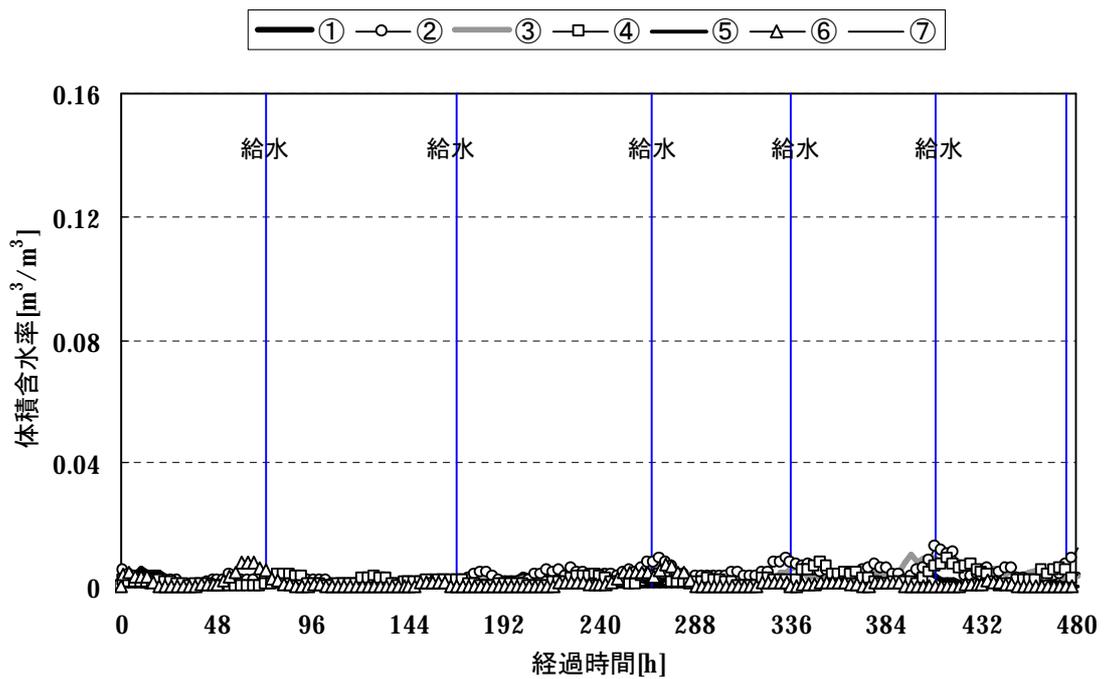


(f) $h=36\text{mm}$

図 4.12 体積含水率の経時変動 (試験体 No3)



(h) h=46mm



(i) h=51mm

図 4.12 体積含水率の経時変動 (試験体 No3)

図 4.13～図 4.15 は体積含水率の平面分布の変化を示したものである。これらの図より、目地からの吸水量の違いや壁体内での水分移動の様相および速さがより鮮明に分かる。

試験体 No1 については、水分が①から②、③、④へと順々に移動していく様子が分かる。また、目地⑦から吸水された水分は右上に移動し、途中から内側(左上)へ回り込んでいると推察される。さらには、②の位置で骨材の影響によって含水率が周囲よりも低くなっている場所も確認できる。

試験体 No2 については、各目地から水分が吸水され、鉛直方向および水平方向に移動していることが分かる。ただし、その量は極めて少ない。

試験体 No3 については、試験体 No2 と同様に、各目地から水分が吸水され、鉛直方向および水平方向に移動していることが分かる。ただし、目地①、⑤、⑦での鉛直方向への水分移動は小さい。目地①から吸水された水分は鉛直方向へ移動せず、多くは水平方向へ移動している。その水分と目地③から吸水された比較的多くの水分の水平方向への移動により②の含水率が増加したことが分かる。

以上のように、試験体は、切断以前には隣接していたにもかかわらず、水分移動の様相は異なっている。すなわち、材料内には水分が移動しやすいところと移動しにくいところが混在していると言える。骨材が密な場所に γ 線が照射された場合、測定結果(含水率)は極端に低下するが、そのような状況と考えられる結果も一部見られる。しかし、多くは空隙構造の違いで生じる物性値のばらつきが水分移動に影響を与えたと考えられる。また、マクロ的に見れば骨材も物性値のばらつきの影響要因の一つである。

この物性値のばらつきと水分移動の様相との関係をより明確にするために、次章以降において数値計算による検討を行う。

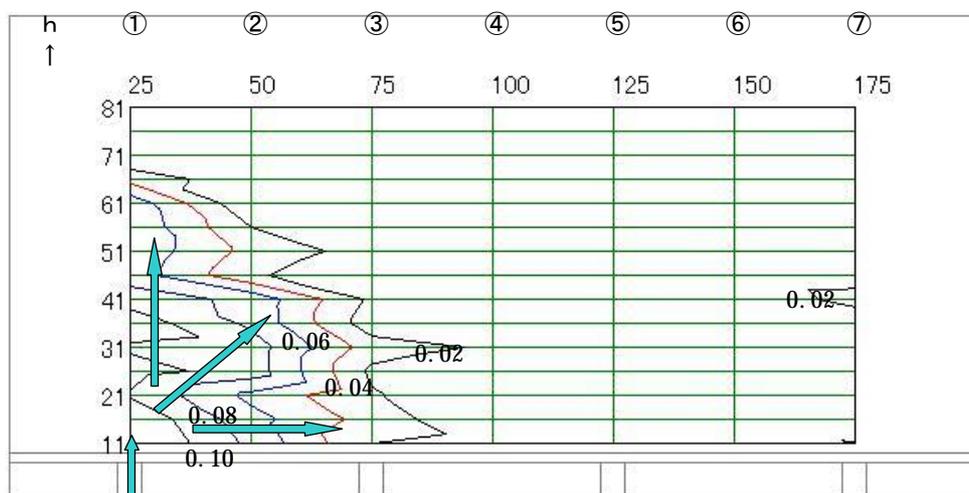
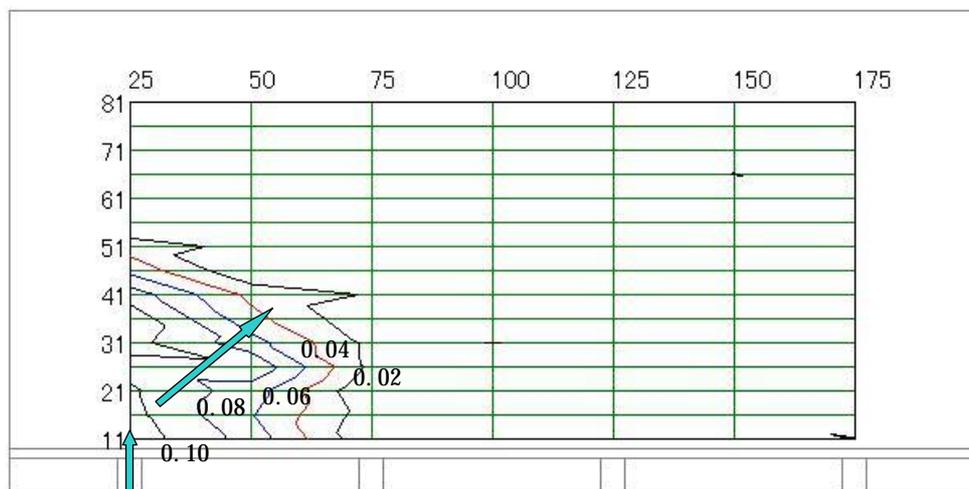
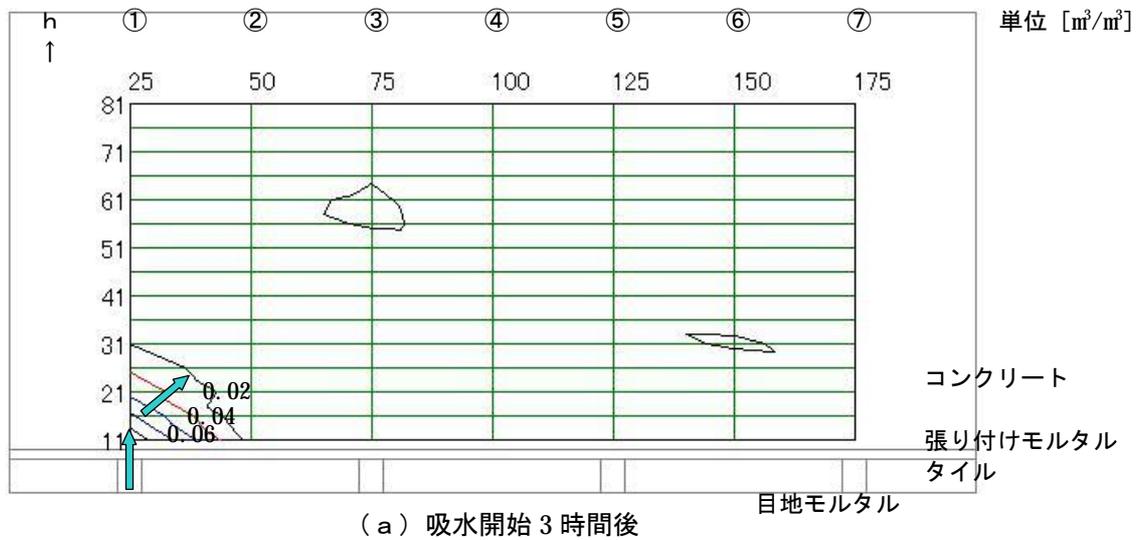


図 4.13 試験体 No1 の含水率分布

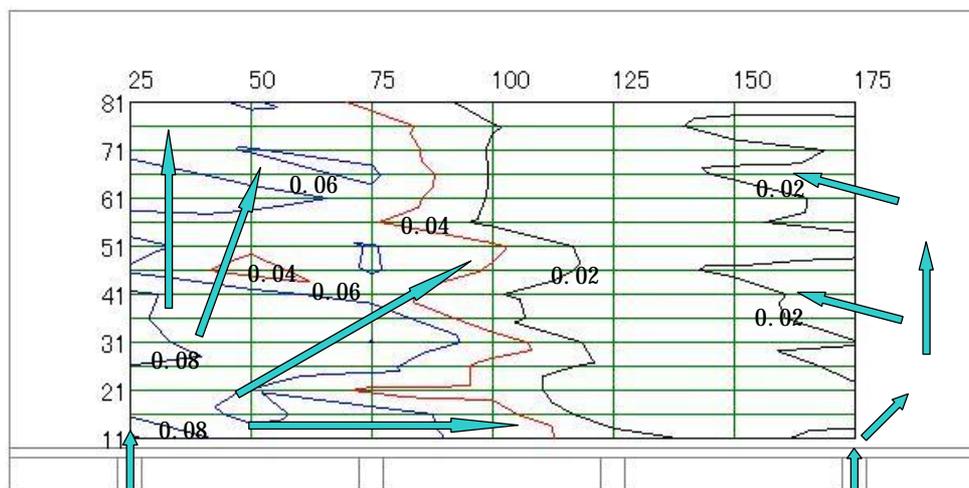
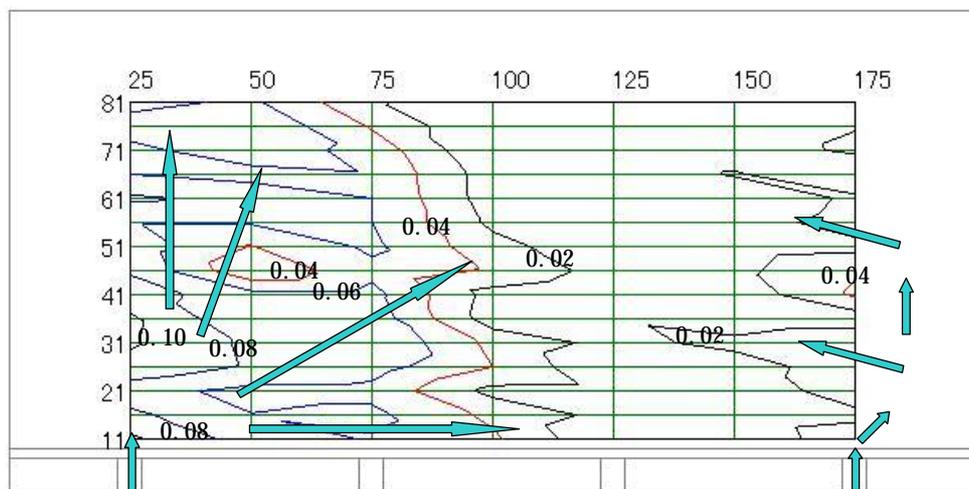
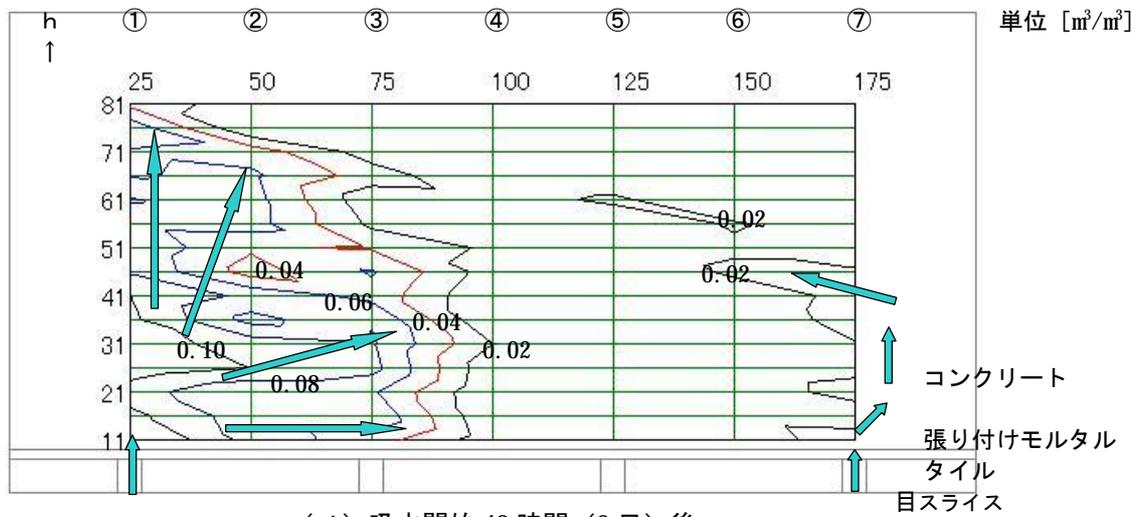


図 4.13 試験体 No1 の含水率分布

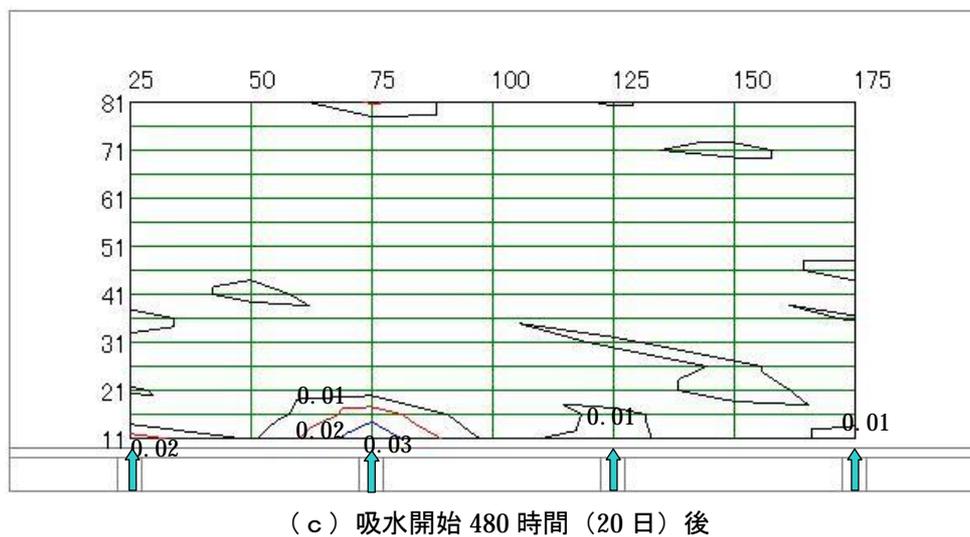
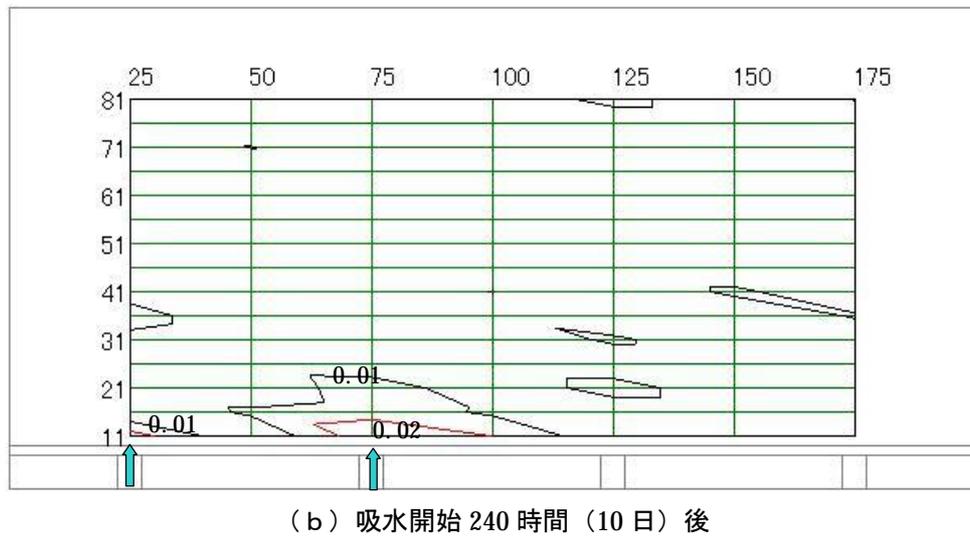
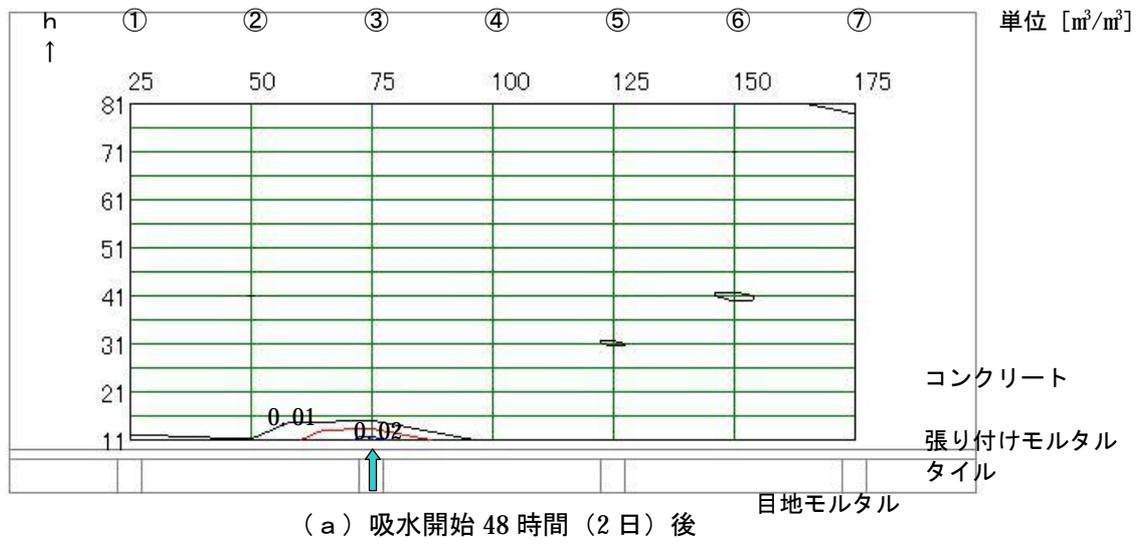


図 4.14 試験体 No2 の含水率分布

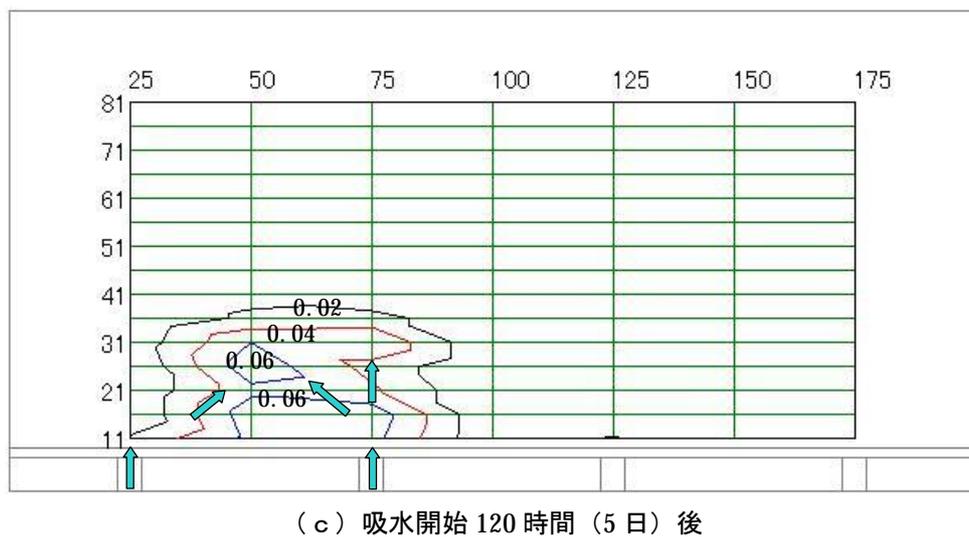
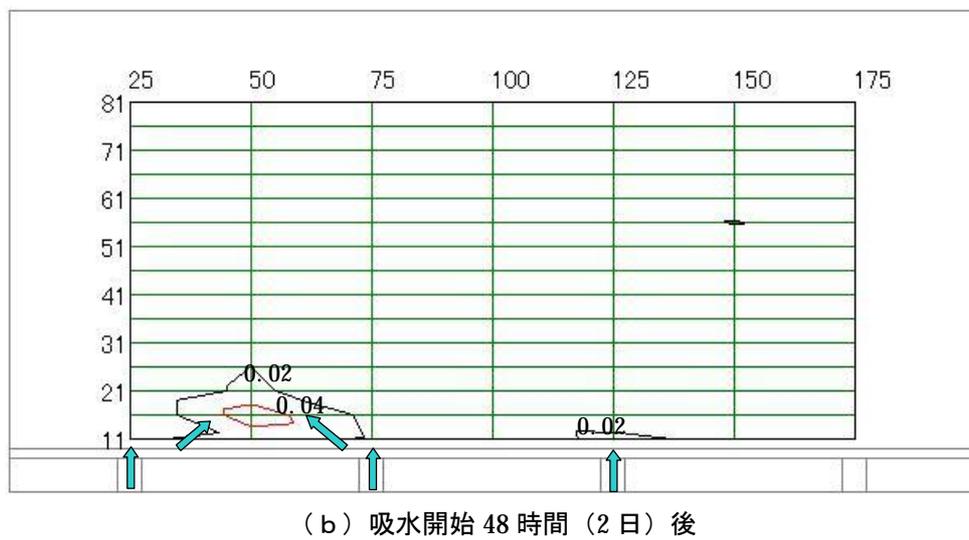
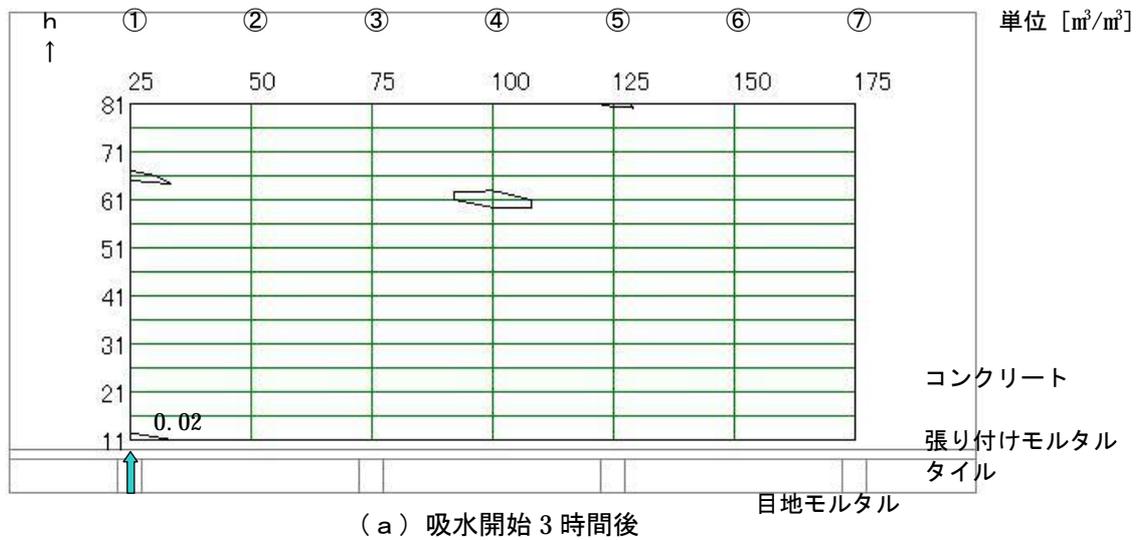


図 4.15 試験体 No3 の含水率分布

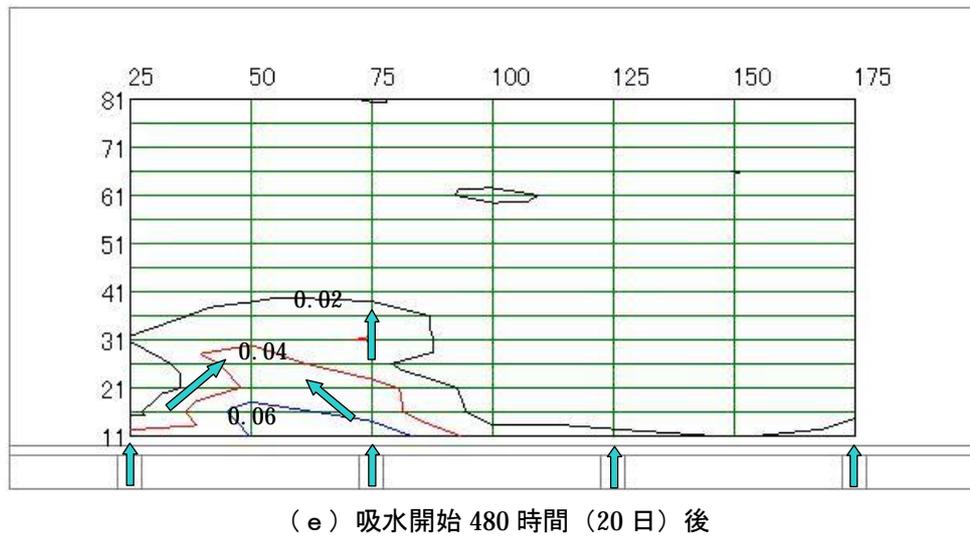
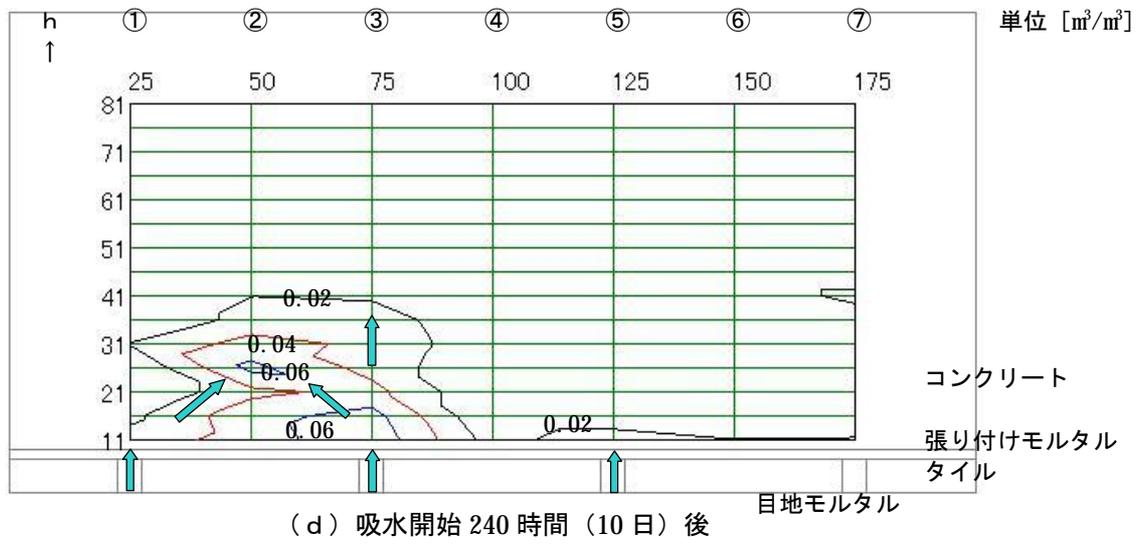


図 4.15 試験体 No3 の含水率分布

4-4 本章のまとめ

本章では、タイル張り仕上げが施されたコンクリート壁体への水分浸透および壁体内での水分移動の挙動を把握するために、一般的なタイル張り仕上げが施されたコンクリート壁体を模した試験体を用いて、等温下で吸水実験を行った。

その結果、実験に用いた3体の試験体は、切断以前には隣接していたにもかかわらず、以下に示すように異なった水分移動性状を示した。

- ・試験体 No1 : 3体の試験体のうち、最も吸水量が大きく、水分の移動速度も速い。また、骨材の影響で水分が回り込んで移動していると考えられる場所が見られた。
- ・試験体 No2 : 3体の試験体のうち、最も吸水量が小さく、水分の移動速度も遅い。
- ・試験体 No3 : 試験体 No1 と同様に、骨材の影響で水分が回り込んで移動していると考えられる場所が見られた。

前章の測定結果で示したようにコンクリートは物性値に比較的大きなばらつきを有する材料であることから、この材料内に水分が移動しやすいところと移動しにくいところが混在する原因の一つとして、骨材の分布性状および空隙の構造や分布性状の違いによって生じる物性値のばらつきの影響が十分に考えられる。

【本章に関連する発表論文】

[3.2] Sadayuki Onmura, Shuichi Hokoi, Takayuki Matsushita, Daisuke Ogura, Kazuya Kominami and Yoshitaka Yasui : 「A Measurement of Concrete Hygrothermal Properties and the Influence of its Scattering on Hygrothermal Behavior in Concrete Walls」、Second Symposium on Heat-Air-Moisture Transport: Measurement and Implications in Buildings, April 19-20, 2009, Vancouver, B. C. Canada (審査中)

[2.7] 安井、銚井、松下、恩村、小椋、小南 : 「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(関東)、pp.339~340、2006.9

[2.9] 恩村、銚井、小椋 : 「タイル張り仕上げのコンクリート壁体への水分浸透 その1 模型に

よる吸水実験」、日本建築学会大会学術講演梗概集（中国）、pp.301～302、2008.9

[3.6] 安井、銚井、松下、恩村、小椋、小南：「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」、平成18年度日本建築学会近畿支部研究報告集、pp.337～340、2006.6

[3.8] 恩村、銚井、小椋：「タイル張り仕上げのコンクリート壁体を模した吸水実験 その1 実験の概要と結果」、平成20年度日本建築学会近畿支部研究報告集、pp.225～228、2008.6

第5章 解析に用いるコンクリートの水分伝導率

5-1 はじめに

前章で示した吸水実験では、水分の浸透および移動の様相が位置により大きく異なった。その原因として物性値のばらつきの影響が考えられた。そこで、その検討のための解析を第4章の吸水実験について行う。

解析においては、第3章での知見「コンクリートは比較的低湿度であっても気相水分だけではなく液相水分の移動も生じている」から、第2章で示した気液の同時移動を考慮した基礎方程式を用いる。この基礎方程式を解くには、水分化学ポテンシャル勾配および温度勾配に関する気相および液相水分伝導率が必要である。しかし、コンクリートの場合、水分伝導率を気相と液相の水分伝導率に分離して測定することは容易ではない。そこで、吸水実験の解析を行う前に、第3章の熱湿気物性の測定結果を用いて、これらの水分伝導率を本章で推定する。

第3章の湿気伝導率測定では、側面を断湿したコンクリート試験片で蓋をした飽和塩水溶液の入ったビーカー全体の重量変化から定常時の水分流を求め、ビーカー内外の水蒸気圧差を用いて湿気伝導率を算出した。この湿気伝導率測定における試験片の定常状態に至るまでの過渡的な重量変化を一次元非定常の数値解析によって再現する。その計算結果と測定結果との比較から、水分伝導率を決定する。

5-2 計算方法

第3章の湿気伝導率測定における水分流の解析モデルを図5.1に示す。基礎式には第2章の熱水分同時移動方程式を用いた。境界条件を次に示す。

水分

(上部)

$$a'_{out} (p_{v_out} - p_{v_top}) = -I'_m \left(\frac{\partial m}{\partial x} - g \right) - I'_T \frac{\partial T}{\partial x} \quad (5.1)$$

(下部)

$$-I'_m \left(\frac{\partial m}{\partial x} - g \right) - I'_T \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{(p_{v_bottom} - p_{v_ssws})}{R'} \quad (5.2)$$

熱

(上部)

$$a_{out} (T_{out} - T_{top}) + r a'_{out} (p_{v_out} - p_{v_top}) = -(l + r l'_{Tg}) \frac{\partial T}{\partial x} - r l'_{mg} \left(\frac{\partial m}{\partial x} - g \right) \quad (5.3)$$

(下部)

$$-(l + r l'_{Tg}) \frac{\partial T}{\partial x} - r l'_{mg} \left(\frac{\partial m}{\partial x} - g \right) = a_{in} (T_{bottom} - T_{in}) + \frac{r(p_{v_bottom} - p_{v_ssws})}{R'} \quad (5.4)$$

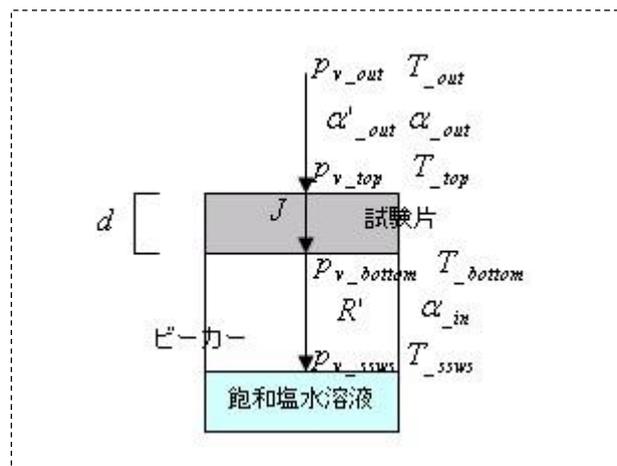


図 5.1 解析モデル

計算は第2章で示した前進型有限差分法で行い、(5.5)式によって得られる試験片上面へ流入または試験片上面から流出する水分流から重量変化を算出し、測定結果と比較した。位置刻みは試験片厚さを10等分した厚さとし、時間刻みは0.1秒とした。初期条件は実測されていないので、ビー

カー内外における外界条件の平均値を用いた（3-3-1節を参照）。

$$W_v = \sum J \times A \times 3600 \times 1000$$

$$J = a'_{-out} (p_{v_out} - p_{v_top}) \quad (5.5)$$

水分化学ポテンシャル勾配および温度勾配に関する気相および液相水分伝導率の推定は以下のように行った。

各水分伝導率は以下の関係にある [52]。

$$I'_m = I'_{mg} + I'_{ml} \quad (5.6)$$

$$I'_T = I'_{Tg} + I'_{Tl} \quad (5.7)$$

気相水分流は以下の式で表現できる。

$$J_g = -I' \nabla p_v \quad (5.8)$$

水蒸気圧 p_v は水分化学ポテンシャル m と温度 T の関数として与えられ、それを $p_v = f(m, T)$ とすると、

$$\nabla p_v = \frac{\partial f}{\partial m} \nabla m + \frac{\partial f}{\partial T} \nabla T \quad (5.9)$$

よって、(5.8)式と(5.9)式より、

$$J_g = -I' \frac{\partial p_v}{\partial m} \nabla m - I' \frac{\partial p_v}{\partial T} \nabla T \quad (5.10)$$

一方、移動ポテンシャルに温度および水分化学ポテンシャルを用いて気相水分流を表現すると、

$$J_g = -I'_{mg} \nabla m - I'_{Tg} \nabla T \quad (5.11)$$

よって、(5.10)式と(5.11)式の関係から、

$$I'_{mg} = I' \frac{\partial p_v}{\partial m}, \quad I'_{Tg} = I' \frac{\partial p_v}{\partial T} \quad (5.12)$$

相対湿度と水蒸気圧および飽和水蒸気圧との関係 ($Rh = p_v / p_{vs}$) と、水分化学ポテンシャルの定義式 ($m = R_v T \ln(Rh)$) を用いると、

$$I'_{mg} = I'_{\frac{p_{vs}}{R_v T}} e^{\frac{m}{R_v T}} = I'_{\frac{p_{vs}}{R_v T}} Rh \quad (5.13)$$

$$I'_{Tg} = I'_{mg} \left(\frac{R_v T \frac{\partial p_{vs}}{\partial T}}{p_{vs}} - \frac{m}{T} \right) \quad (5.14)$$

液相水分の移動がダルシー則に従うとすると、 $I'_{Tl} = 0$ となり、(5.7) 式から

$$I'_T = I'_{Tg} \quad (5.15)$$

である [52]。

ここでの湿気伝導率 I' は気相水分のみの理論上の湿気伝導率であり、含水率の増加とともに減少し、飽和状態では 0 になると考えられる。よって、ここでは最も単純な式である含水率の一次式で表現する。

$$I' = C_1(\Phi - y) / \Phi \quad (5.16)$$

(5.6) 式、(5.13) 式、(5.16) 式より、

$$I'_{m} = I'_{\frac{p_{vs}}{R_v T}} - \frac{C_1(\Phi - y)}{\Phi} \cdot \frac{p_{vs}}{R_v T} e^{\frac{m}{R_v T}} \quad (5.17)$$

一方、湿気伝導率（気相水分のみならず液相水分の移動をも含んだ見かけの湿気伝導率）の測定では、雰囲気温度が一定の下、試験片に与えた水蒸気圧差が既知なので、試験片中央の水分化学ポテンシャル勾配が得られる（図 5.2 を参照）。また、各測定に対して定常時の水分流が得られているので、試験片中央の相対湿度に対応する水分化学ポテンシャル勾配に関する水分伝導率が下式から求められる。ここでは、雰囲気温度と相対湿度が $20^\circ\text{C} \cdot 55\%$ の下、ビーカー内の飽和塩水溶液が平衡する相対湿度が 11%、33%、75%、94% の 4 条件について、水分伝導率を求めた。

$$I'_{m} = \frac{2J \cdot \Delta d}{\Delta m} \quad (5.18)$$

(5.17)式と(5.18)式から同数の液相水分伝導率が求まるので、それらの値を用いて液相水分伝導率を以下のように指数関数で近似する (図 5.3 を参照)。

$$I'_{m} = C'_i e^{C''_i R_v T \ln(Rh)}、 \quad i=1\sim 3 \quad (5.19)$$

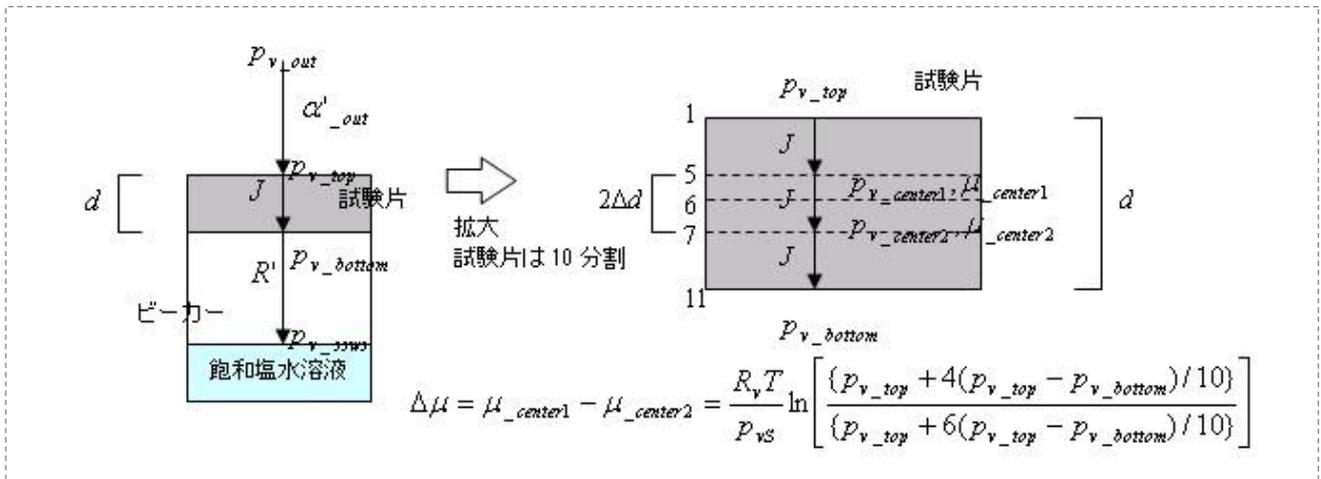


図 5.2 試験片中央の水分化学ポテンシャル勾配の算出方法

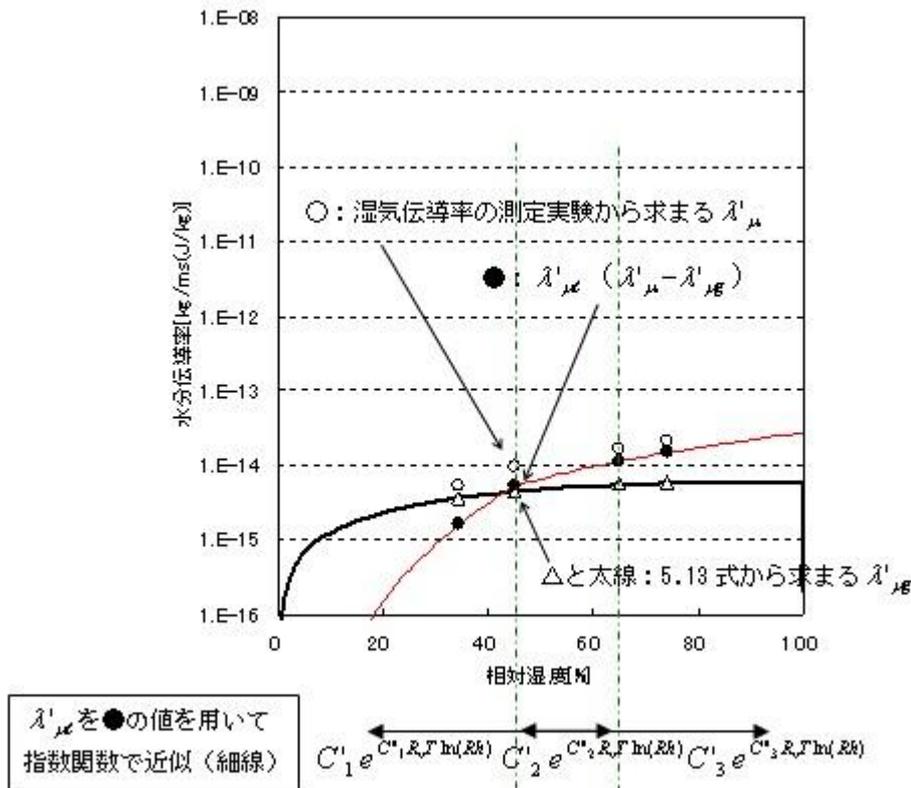


図 5.3 水分化学ポテンシャル勾配に関する液相水分伝導率の推定方法

高湿度域における湿気伝導率と透水係数の測定結果から、飽和近傍から飽和にかけての湿度域での水分伝導率は急激に変化すると考えられる。そこで、その湿度域では別の指数関数を用いて表現する。

$$I'_{m} = C'_4 e^{C''_4 R_v T \ln(Rh)} \quad (5.20)$$

等温場における飽和時 ($Rh = 1.0$) の水分流は、ダルシー則より下式で表される。

$$J = -r_w K \Delta \Psi \quad (5.21)$$

水分化学ポテンシャルと水頭の関係 $m = g\Psi$ から、

$$J = \frac{-r_w K}{g} \nabla m \quad (5.22)$$

一方、移動ポテンシャルとして水分化学ポテンシャルを用いて表現すると、

$$J = -I'_{m} \nabla m \quad (5.23)$$

よって、

$$I'_{m} = r_w K / g \quad (5.24)$$

この関係を (5.20) 式に用いると、

$$C'_4 = r_w K / g \quad (5.25)$$

また、(5.19) 式と (5.20) 式の連続性より、二つの関数の交点の相対湿度を C_2 とすると、次式が成り立つ。

$$C'_3 e^{B_3 R_v T \ln(C_2)} = \frac{r_w K}{g} e^{C''_4 R_v T \ln(C_2)} \quad (5.26)$$

すなわち、係数 $C'_1 \sim C'_3$ および係数 $C''_1 \sim C''_3$ は、 C_1 をパラメータに気相水分の湿気伝導率が決

まれば求められる。係数 C'_4 は、透水係数の測定結果を用いることで求まり、係数 C''_4 も水分伝導率が著しく変化する点での相対湿度 C_2 を決めることで求められる。

したがって、パラメータ C_1 、 C_2 を適切に決めることで、すべての湿度域で水分化学ポテンシャル勾配に関する液相水分伝導率を決定することができる（図 5.4 を参照）。

湿気伝導率測定における水分流の測定結果と計算値との比較を行い、試行錯誤によってこれらのパラメータを決定する。

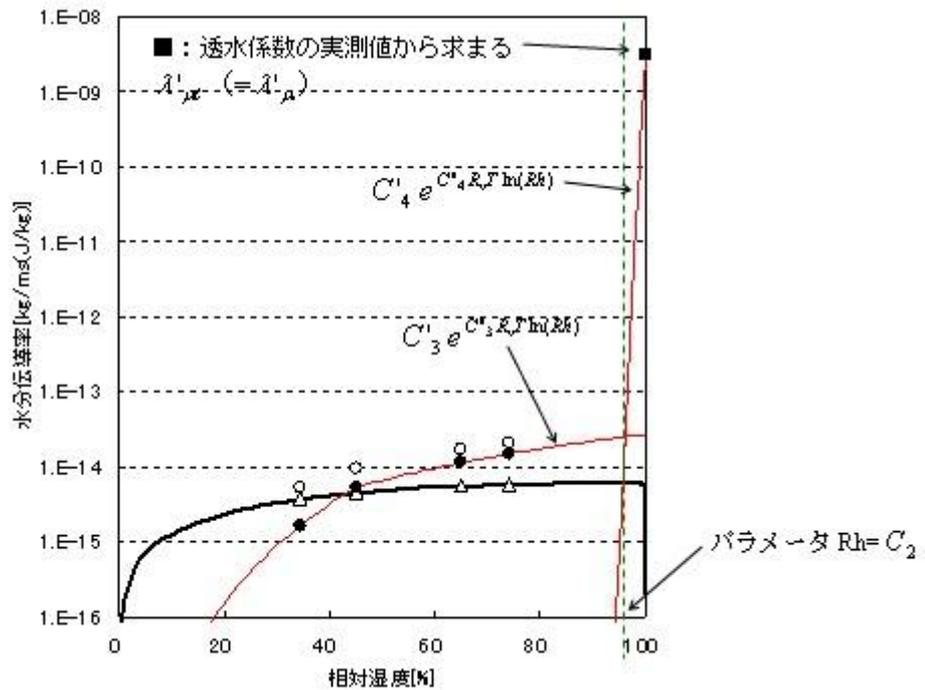


図 5.4 水分化学ポテンシャル勾配に関する液相水分伝導率の推定方法（飽和近傍～飽和）

ここで、

A : 試験片の断面積 [m^2]、 d : 試験片の厚さ [m]、 g : 重力加速度 [9.8m/s^2]、 J : 水分流 [$\text{kg/m}^2\text{s}$]、 J_g : 気相水分流 [$\text{kg/m}^2\text{s}$]、 K : 透水係数 [m/s]、 p_v : 水蒸気圧 [Pa]、 $p_{v,s}$: 飽和水蒸気圧 [Pa]、 Rh : 相対湿度 [-]、 R_v : 水蒸気の気体定数 [$461.643\text{Pam}^3/\text{kgK}$]、 R' : ビーカー内の湿気抵抗 [$\text{m}^2\text{sPa/kg}$]、 r : 相変化熱 [J/kg]、 T : 温度 [K]、 W_v : 重量変化 [g/h]、 x : 位置 [m]、 a : 総合熱伝達率 [$\text{W/m}^2\text{K}$]、 a' : 湿気伝達率 [$\text{kg/m}^2\text{sPa}$]、 I : 熱伝導率 [W/mK]、 I' : 気相水分の湿気伝導率 [kg/msPa]、 I'_T : 温度勾配に関する水分伝導率 [kg/msK]、 I'_{Tg} : 温度勾配に関する気相水分伝導率 [kg/msK]、 I'_{Tl} : 温度勾配に関する液相水分伝導率 [kg/msK]、 I'_m : 水分化学ポテンシャル勾配に関する水分伝導率 [kg/ms(J/kg)]、 I'_{mg} : 水分化学ポテンシャル勾配に関する気相水分伝導率 [kg/ms(J/kg)]、 I'_{ml} : 水分化学ポテンシャル勾配に関する液相水分伝導率 [kg/ms(J/kg)]、 m : 水分化学ポテンシャル [J/kg]、 r_w : 水の密度 [1000.0kg/m^3]、 y : 体積含水率 [m^3/m^3]、 Φ : 空隙率 [-]、 Ψ : 水頭 [m]、 $\Delta\Psi$: 水頭差 [m]、 Δd : 試験片を厚さ方向に 10 分割したときの幅 [m]、 Δm : 試験片中央より Δd だけ上の位置での水分化学ポテンシャルと試験片中央より Δd だけ下の位置での水分化学ポテンシャルとの差 [J/kg]、 $C'_1 \sim C'_4$ と $C''_1 \sim C''_4$: 定数、 C_1 と C_2 : パラメータ

(添え字)

$_{out}$: ビーカー外空気、 $_{in}$: ビーカー内空気、 $_{ssws}$: 飽和塩水溶液と平衡するという意、 $_{top}$: 試験片上面、 $_{bottom}$: 試験片下面、 $_{center1}$: 試験片中央より Δd だけ上の位置、 $_{center2}$: 試験片中央より Δd だけ下の位置

5-3 計算に用いた数値

相対湿度 10% から 98% までの間の平衡含水率は、吸湿過程における設定相対湿度 33% と 93% の測定値の平均を用いて直線で近似した。このとき、Fc33 と Fc40 については、一つの直線で表現すると測定結果との誤差が大きくなるので、2 種類の直線を用いて近似した。なお、Fc40 の相対湿度 85% における値は傾向が他とやや異なるので、コンクリートの持つばらつきと判断して近似には考慮していない。相対湿度 10% 以下は、相対湿度 0% で平衡含水率が $0\text{m}^3/\text{m}^3$ になるような直線で近似し、相対湿度 98% 以上の高湿度域は、飽和近傍で急激に平衡含水率が高くなるように双曲線を用いて近似した。なお、相対湿度 100% での値は、30 日以上水中（深さ約 60cm）に浸漬した後の重量を用いて算定した各試験片の体積含水率の平均であり、Fc27 が $0.123\text{m}^3/\text{m}^3$ 、Fc33 が $0.133\text{m}^3/\text{m}^3$ 、Fc40 が $0.136\text{m}^3/\text{m}^3$ である。脱気を行っていないが、本論ではこれらの値を空隙率として使用した。図 5.5 に平衡含水率の近似を示す。

透水係数には測定値の平均を用いた。

熱伝導率には測定値の平均を最小二乗法で直線近似したものを用いた。図 5.6 に熱伝導率の近似を示す。熱容量には水分の影響を、相変化熱には温度効果を考慮した (5.27) 式と (5.28) 式に示す既存の式を用いた。ここで、コンクリートの比熱 c_c には文献値 837.2 J/kgK [58] を、比重量 r_c には平衡含水率測定の際に実測した全試験片の乾燥時密度の平均、 2163.0 kg/m^3 を用いた。

$$cr = 4186.05 r_w y + c_c r_c \quad (5.27)$$

$$r = 4186.05 \{597.5 - 0.599(T - 293.16)\} \quad (5.28)$$

試験片上面の湿気伝達率、ピーカー内空気の湿気抵抗および総合熱伝達率には表 5.1 に示す文献値 [55]、[58] を用いた。飽和水蒸気圧には (5.29) 式に示す Goff-Gratch の実験式を用いた。

$$\begin{aligned} \log_{10} p_{vs} = & 2.78614 + 10.79574 \left(1 - \frac{273.16}{T}\right) - 5.028 \log_{10} \left(\frac{T}{273.16}\right) \\ & + 1.50475 \times 10^{-4} \left[1 - 10^{-8.2969 \left(\frac{T}{273.16} - 1\right)}\right] + 0.42873 \times 10^{-3} \left[10^{4.76955 \left(1 - \frac{273.16}{T}\right)} - 1\right] \end{aligned} \quad (5.29)$$

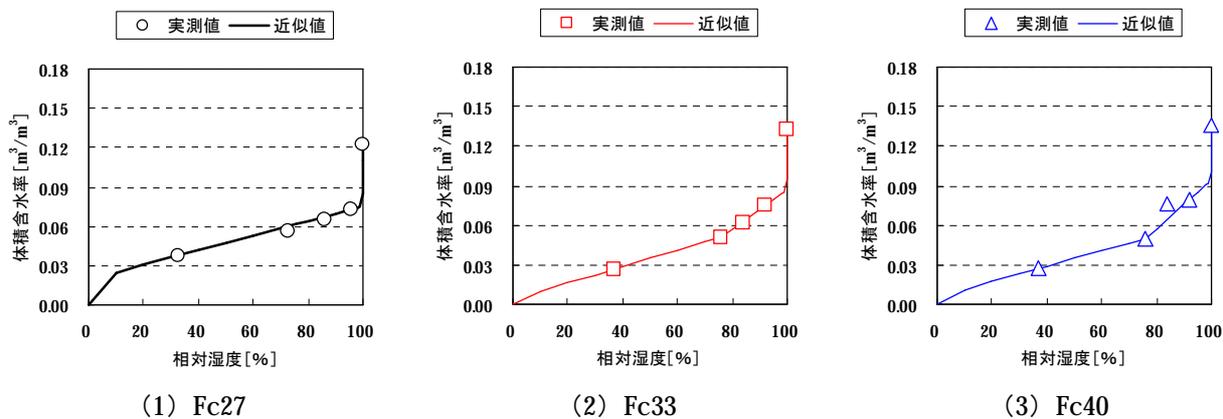


図 5.5 平衡含水率の近似

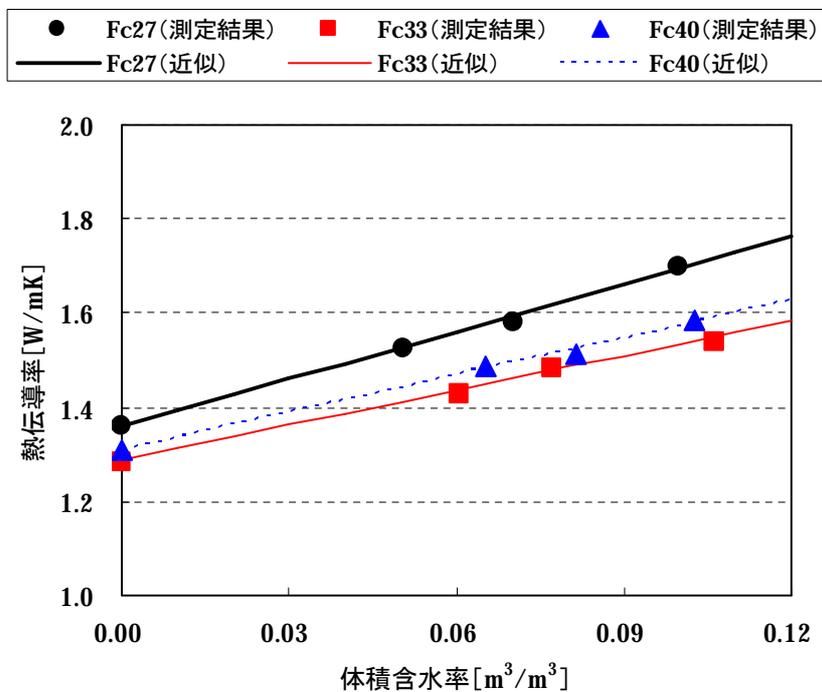


図 5.6 熱伝導率の近似

表 5.1 計算に用いた伝達率および抵抗

湿気伝達率	上向き湿流の場合	$4.16 \times 10^{-8} \text{kg/m}^2 \text{sPa}$
	下向き湿流の場合	$2.92 \times 10^{-8} \text{kg/m}^2 \text{sPa}$
湿気伝達抵抗	上向き湿流の場合	$1.41 \times 10^8 \text{m}^2 \text{sPa/kg}$
	下向き湿流の場合	$8.37 \times 10^8 \text{m}^2 \text{sPa/kg}$
総合熱伝達率	ビーカー内外とも	$9.0 \text{W/m}^2 \text{K}$

5-4 計算結果と考察

パラメータに表 5.2 に示す値を用いたときの外界温度が 20°Cにおける試験片重量の測定結果と計算値との比較を図 5.7 に示す。重量変化の傾きが水分流の大きさを表す。水分流の測定結果と計算値との比較を表 5.3 に示す。測定結果に対して計算値は、Fc27 が 0.89~1.04 倍、Fc27 が 0.93~1.04 倍、Fc27 が 0.92~1.00 倍であり、かなり良く一致している。

図 5.8 と表 5.4 は温度を 30°Cに変えた場合における結果である。計算値と測定結果との差は、20°Cの場合と比べて 65% (75_55) と 73.5% (92_55) においてやや大きくなっているが、比較的良く一致している。

以上から、第 3 章の測定で用いたコンクリートの水分伝導率が推定された (図 5.9 を参照)。以後の解析では本章で推定した値を基本に用いる。

表 5.2 パラメータに用いた値

強度	パラメータ	
	C ₁	C ₂
Fc27	10×10 ⁻¹³	0.961
Fc33	7×10 ⁻¹³	0.962
Fc40	6×10 ⁻¹³	0.971

表 5.3 水分流の測定結果と計算値 (20°C)

条件	Fc27			Fc33			Fc40		
	測定結果	計算値	差	測定結果	計算値	差	測定結果	計算値	差
33% (11_55)	0.802	0.834	1.04	0.634	0.660	1.04	0.586	0.585	1.00
44% (33_55)	0.574	0.508	0.89	0.424	0.395	0.93	0.311	0.308	0.99
65% (75_55)	-0.664	-0.649	0.98	-0.568	-0.556	0.98	-0.502	-0.460	0.92
74.5% (94_55)	-1.413	-1.378	0.98	-1.302	-1.268	0.97	-0.961	-0.894	0.93
91.5% (100_83)	-1.957	-1.933	0.99	-1.907	-1.886	0.99	-1.368	-1.310	0.96

※水分流の単位は [×10⁻⁷kg/m²s] である

※差は測定結果に対して計算値が何倍であるかで表示している

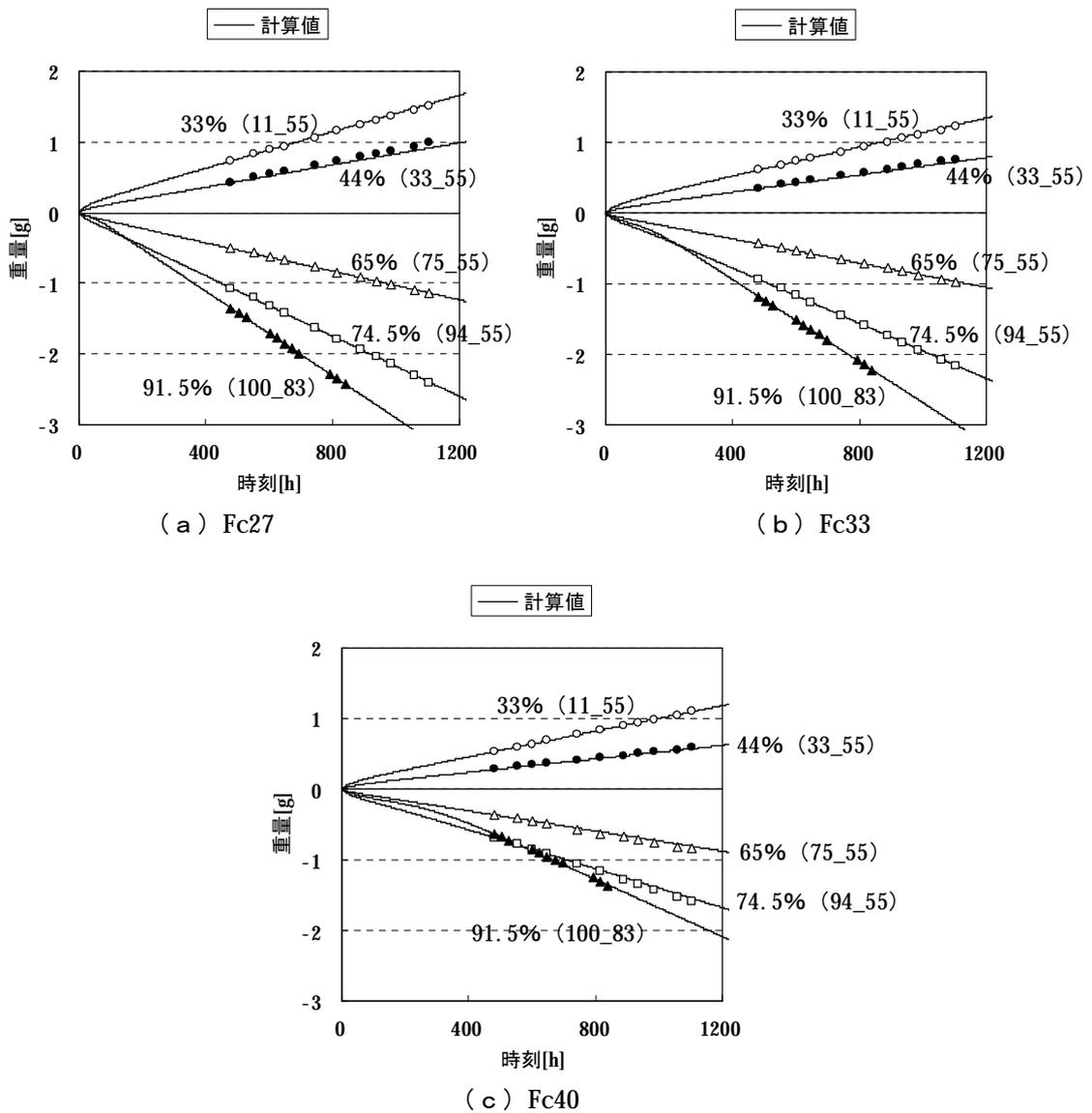


図 5.7 重量変化量の測定結果と計算値との比較 (20°C)

※図中のシンボルは測定結果を表す。

※33% (11_55) は飽和塩水溶液または蒸留水が平衡する相対湿度 11%、外界相対湿度 55%、それらの平均 33%を表す。

表 5.4 水分流の測定結果と計算値 (30°C)

条件	Fc27			Fc33			Fc40		
	測定結果	計算値	差	測定結果	計算値	差	測定結果	計算値	差
33% (11_55)	1.335	1.301	0.97	1.068	1.054	0.99	0.986	0.941	0.95
43.5% (32_55)	0.725	0.768	1.06	0.677	0.614	0.91	0.518	0.491	0.95
65% (75_55)	-0.974	-0.854	0.88	-0.862	-0.726	0.84	-0.779	-0.605	0.78
73.5% (92_55)	-1.997	-1.672	0.84	-1.931	-1.494	0.77	-1.486	-1.099	0.74

※水分流の単位は $[\times 10^{-7} \text{kg/m}^2 \text{s}]$ である

※差は測定結果に対して計算値が何倍であるかで表示している

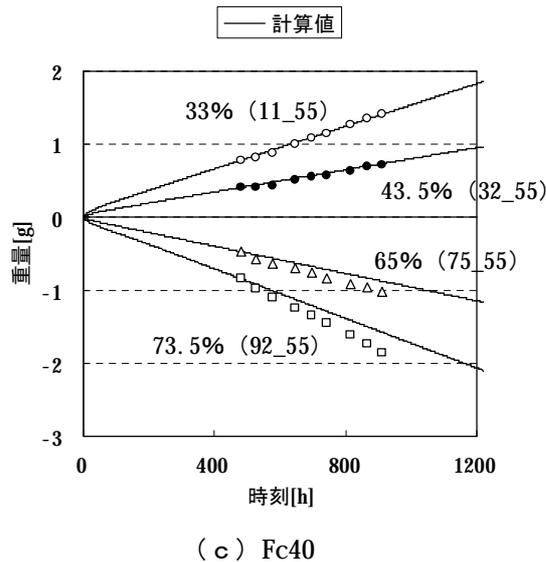
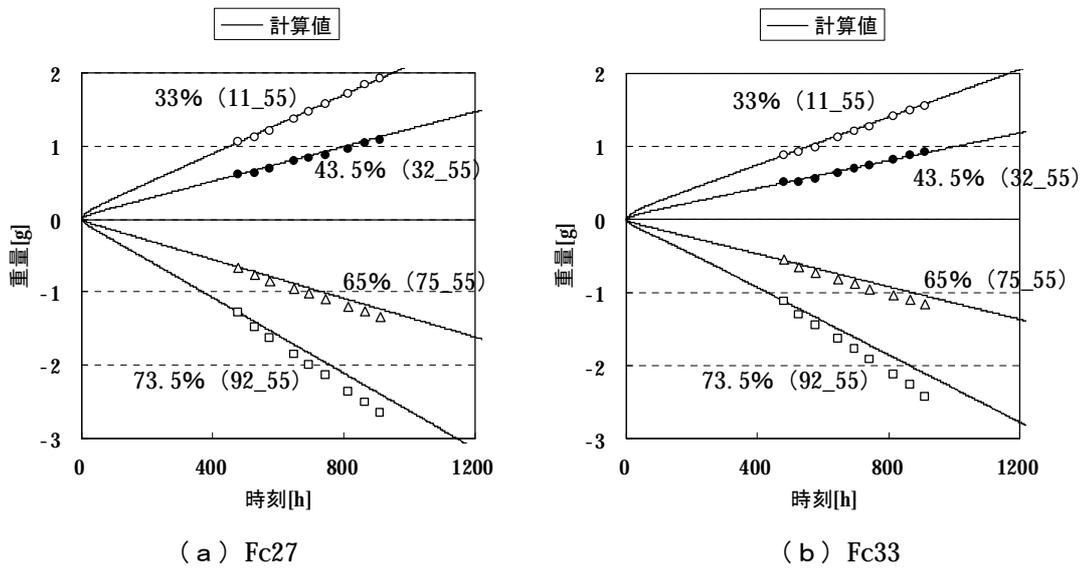
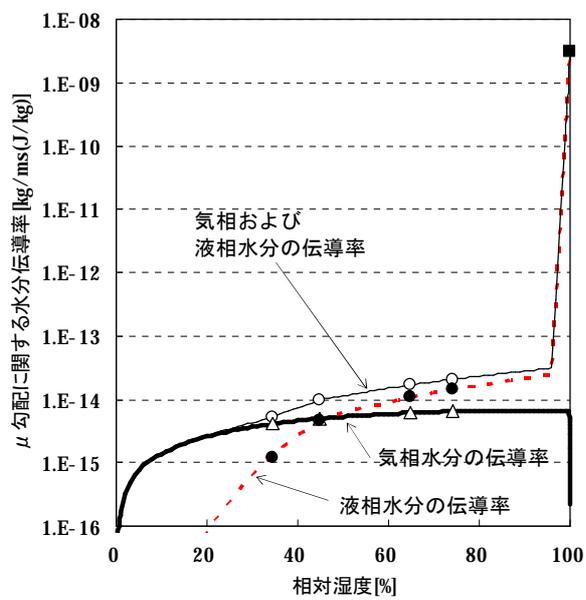


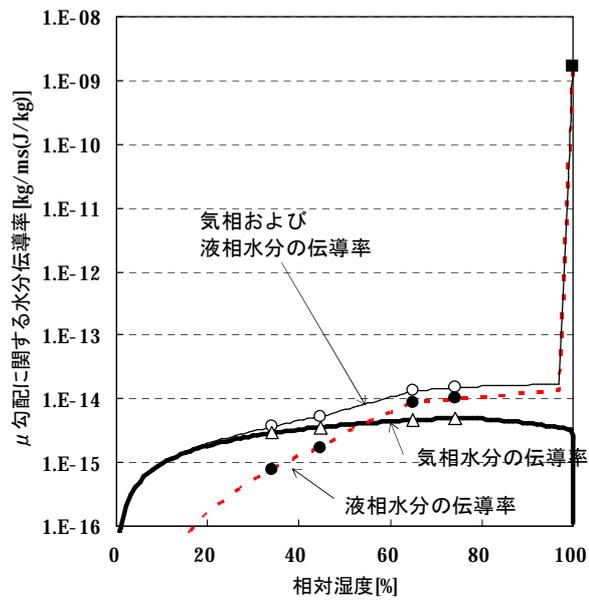
図 5.8 重量変化量の測定結果と計算値との比較 (30°C)

※図中のシンボルは測定結果を表す。

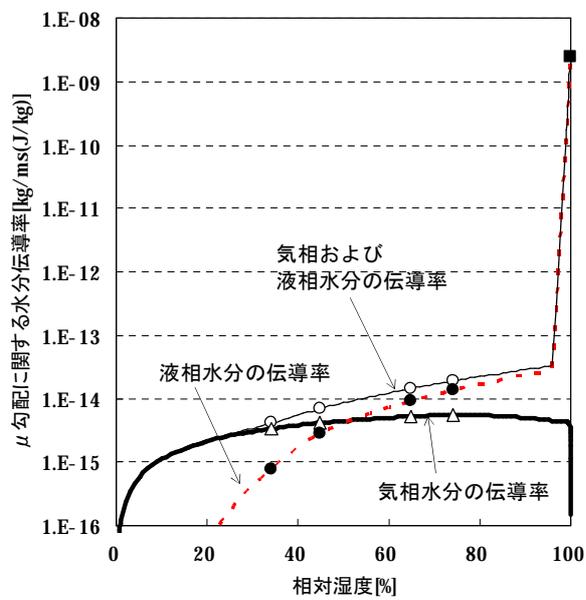
※33% (11_55) は飽和塩水溶液が平衡する相対湿度 11%、外界相対湿度 55%、それらの平均 33%を表す。



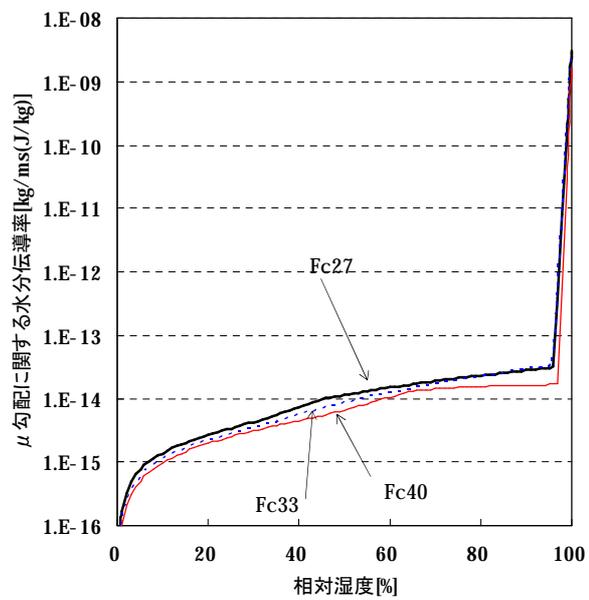
(a) Fc27



(b) Fc33



(c) Fc40



(d) 全強度

図 5.9 水分伝導率の推定 (20°C)

5-5 本章のまとめ

本章では、第3章で示した熱湿気物性の測定結果を用いて、湿気伝導率測定における試験片の重量変化を計算し、計算結果と測定結果とを比較することで、コンクリートの水分化学ポテンシャル勾配および温度勾配に関する気相および液相水分伝導率を推定した。以後の解析では本章の値を基本に用いる。

【本章に関連する発表論文】

- [2.5] 安井、銚井、松下、恩村、小椋、小南：「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3 透水係数の測定、気液分離法の提案」、日本建築学会大会学術講演梗概集（近畿）、pp.381～382、2005.9
- [2.6] 恩村、銚井、松下、小椋、小南、安井：「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（関東）、pp.337～338、2006.9
- [2.7] 安井、銚井、松下、恩村、小椋、小南：「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（関東）、pp.339～340、2006.9
- [3.4] 安井、銚井、松下、恩村、小椋、小南：「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3 透水係数の測定、気液分離法の提案」、平成17年度日本建築学会近畿支部研究報告集、pp.285～288、2005.6
- [3.5] 恩村、銚井、松下、小椋、小南、安井：「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」、平成18年度日本建築学会近畿支部研究報告集、pp.333～336、2006.6
- [3.6] 安井、銚井、松下、恩村、小椋、小南：「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」、平成18年度日本建築学会近畿支部研究報告集、pp.337～340、2006.6

第6章 吸水実験の解析

6-1 はじめに

第4章で示したタイル張り仕上げが施されたコンクリート試験体の吸水実験では、水分の浸透および移動の様相が位置の違いで大きく異なった。その原因と考えられる物性値のばらつきの影響を検討するために吸水実験に関する解析を行う。

本章では、最初に計算条件を示し、次に、第5章で推定した水分伝導率を用いた計算結果と第4章の測定結果との比較について述べる。

6-2 計算条件

6-2-1 解析対象

解析対象は図6.1に示すように、側面が断湿された198mm×98mmの大きさのコンクリート試験体(張り付けモルタルと目地モルタルを含む)で、鉛直方向と水平方向の2次元の系を対象とする。張り付けモルタルや目地モルタルとの界面を除くタイル部分は、水分を通さないので解析対象には含めない。吸水は目地モルタルの下面で行われ、試験体の上面で吸放湿されるものとする。

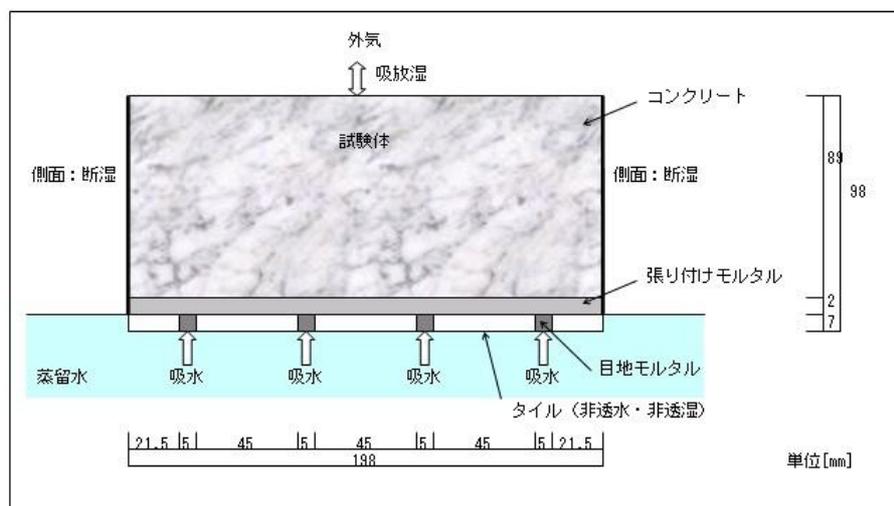


図 6.1 解析対象の概要

6-2-2 基礎式と境界条件

基礎式には第2章に示した熱水分同時移動方程式を用いる。図6.2に境界条件の概要を示す。

試験体上面における鉛直方向の熱および水分の移動は、第3種境界条件とした(後述の①を参照)。側面の水平方向の移動については、熱は第3種境界条件、水分は断湿とする第2種境界条件とした(後述の②を参照)。

タイルと張り付けモルタルとの界面では、熱については温度を一定とし(第1種境界条件)、鉛直方向の水分移動については断湿とする第2種境界条件とした(後述の③を参照)。同様に、タイルと目地モルタルとの界面では、熱については温度を一定とし(第1種境界条件)、水平方向の水分移動については断湿とする第2種境界条件とした(後述の③を参照)。

目地モルタル下面の吸水面では、熱、水分とも第1種境界条件とした(後述の④を参照)。

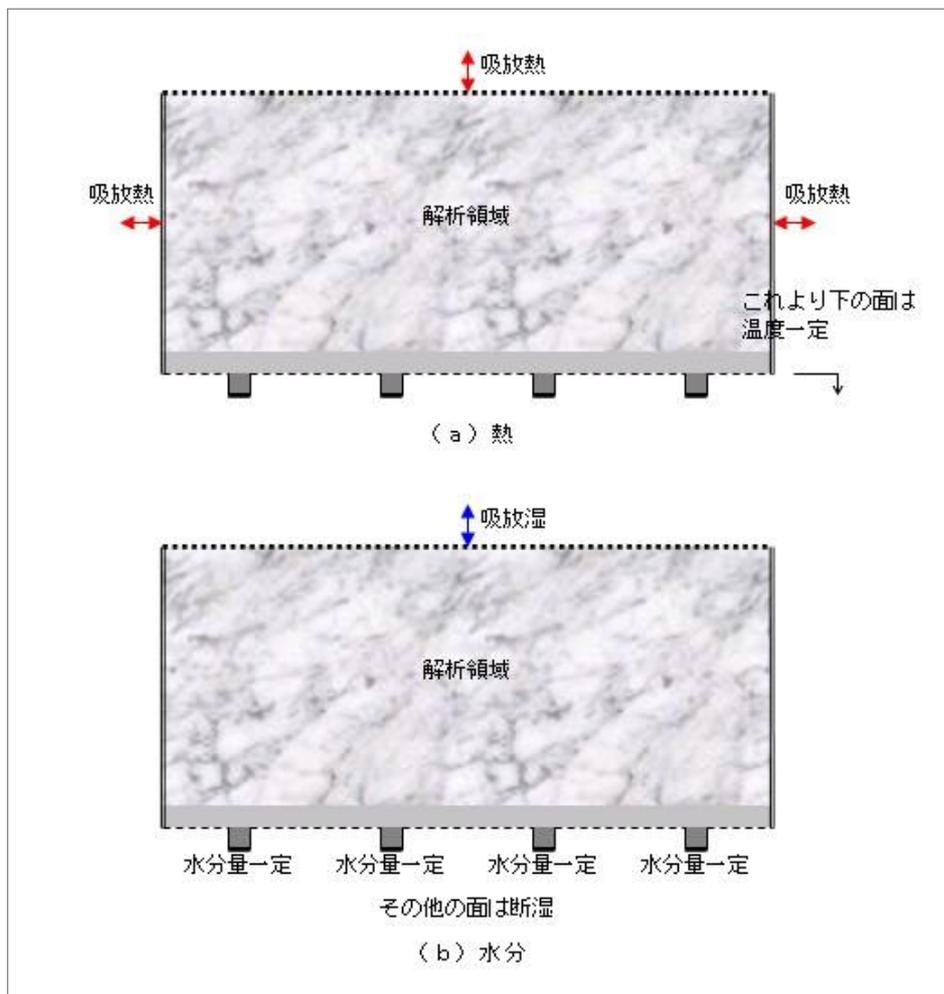


図 6.2 境界条件の概要

外気の温度および相対湿度の測定結果には、周期的な変動（変動幅はそれぞれ±3℃、±10%）が見られた。しかし、その変動が目地からの水分浸透および内部への水分移動に及ぼす影響は小さいと考えられたので、解析では外気の温度および相対湿度は一定とし、測定結果の平均値である16.9℃と43.1%を用いた（周辺雰囲気温度および相対湿度の変動が解析結果に及ぼす影響については付録B、p208～に示す）。

また、試験体側面の温度の測定結果が外気温度の測定結果とほとんど同じであったので、熱の第1種境界条件として与える温度には、外気温度と同じ16.9℃（一定値）を用いた。

水分の第1種境界条件には水分化学ポテンシャルの一定値を与えた。水と接しているため、本来ならば0 J/kg とすべきであるが、その場合、水分量の増減がない状況（ $\partial y / \partial m = 0$ ）が生じる可能性があり、0 による除算によってコンピュータによる計算がエラーとなる。そこで、1次元の系におけるコンクリート壁体の吸水過程について、吸水面の水分化学ポテンシャルを-1J/kg、-10J/kg、-100J/kg と変えて計算を行った。その結果、-1J/kg を用いた場合と-10J/kg を用いた場合の計算結果がほとんど同じであったので、計算時間の短縮が可能な-10J/kg を用いることとした。

以下に境界条件式を示す。

① 熱、水分とも第3種境界条件の場合

$$\text{(水分)} \quad J = a'_m (m - m_{out}) + a'_T (T - T_{out}) \quad (6.1)$$

$$\text{(熱)} \quad q = a(T - T_{out}) + ra'_m (m - m_{out}) + ra'_T (T - T_{out}) \quad (6.2)$$

② 熱が第3種境界条件、水分が断湿の場合

$$\text{(水分)} \quad J = 0 \quad (6.3)$$

$$\text{(熱)} \quad q = a(T - T_{out}) \quad (6.4)$$

③ 熱が第1種境界条件、水分が断湿の場合

$$\text{(水分)} \quad J = 0 \quad (6.5)$$

$$\text{(熱)} \quad T = T_{out} \quad (6.6)$$

④ 熱、水分とも第1種境界条件の場合

$$\text{(水分)} \quad m = -10 \quad (6.7)$$

$$\text{(熱)} \quad T = T_{out} \quad (6.8)$$

ここで、

J : 水分流 [$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$]、 q : 熱流 [W/m^2]、 r : 相変化熱 [J/kg]、 T : 温度 [K]、 a : 総合熱伝達率 [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]、 a'_T : 温度勾配に関する水分伝達率 [$\text{kg}/\text{m}^2\text{sK}$]、 a'_m : 水分化学ポテンシャル勾配に関する水分伝達率 [$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}(\text{J}/\text{kg})$]、 m : 水分化学ポテンシャル [J/kg]

添え字)

out : 外気

6-2-3 初期条件

温度の初期条件には外気温を与えた。

相対湿度の初期条件は乾燥後なので、本来ならば0%に近い値を与えるべきであるが、水と接する場合と同様に、計算の途中で水分量の増減がない状況 ($\partial y / \partial m = 0$) が生じる可能性がある (0による除算でコンピュータによる計算がエラーとなる)。そこで、1次元の系におけるコンクリート壁体の吸水過程について、相対湿度の初期条件を1%、2%、10%に変えて計算を行った。その結果、1%を用いた場合と2%を用いた場合の計算結果がほとんど同じであったので、0%に近い1%を用いることとした。

なお、吸水面の水分化学ポテンシャルは-10J/kgである。

6-2-4 計算に用いた数値

コンクリートの水分化学ポテンシャル勾配および温度勾配に関する気相および液相水分伝導率には、第5章で推定した値を用いた。張り付けモルタルおよび目地モルタルの物性については、測定していないが、コンクリートと大きな差異はないと考え、コンクリートと同じ値を用いる。

コンクリートの平衡含水率関係と熱伝導率には測定結果を近似したものを用いた (第5章の図5.5および図5.6を参照)。

コンクリートの熱容量には水分の影響を、相変化熱には温度効果を考慮した（第5章の（5.27）式、（5.28）式）。飽和水蒸気圧には Goff-Gratch の近似式を用いた（第5章の（5.29）式）。

その他、計算に用いた数値は、第5章の解析で用いたものと同じである。ただし、水分伝達率は下式を用いて算定した（2-2-4節を参照）。

$$a'_m = a' \frac{p_{vS}}{R_v T} Rh \quad (6.9)$$

$$a'_T = a'_m \left(\frac{R_v T}{p_{vS}} \cdot \frac{\partial p_{vS}}{\partial T} - \frac{m}{T} \right) \quad (6.10)$$

ここで、

p_{vS} : 飽和水蒸気圧 [Pa]、 Rh : 相対湿度 [-]、 R_v : 水蒸気の気体定数 [461.643Pa³/kgK]、 T : 温度 [K]、 a' : 湿気伝達率 [2.92×10^{-8} kg/m²sPa]（表 5.1 を参照）、 a'_T : 温度勾配に関する水分伝達率 [kg/m²sK]、 a'_m : 水分化学ポテンシャル勾配に関する水分伝達率 [kg/m²s(J/kg)]、 m : 水分化学ポテンシャル [J/kg]

6-2-5 計算方法

数値計算には前進型有限差分法を用いた。

第2章で示した水分収支式を2次元の系で表すと次式となる。

$$r_w \left(\frac{\partial y}{\partial m} \right) \frac{\partial m}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(I'_m \frac{\partial m}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(I'_T \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(I'_m \left(\frac{\partial m}{\partial y} - g \right) \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(I'_T \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (6.11)$$

図 6.3 に示す座標系で、前進型有限差分法を用いてこの式を表現すると、

$$\begin{aligned} r_w \left(\frac{\partial y}{\partial m} \right)_{i,j}^k \left(\frac{\Delta x_{i-1} + \Delta x_i}{2} \right) \left(\frac{\Delta y_{j-1} + \Delta y_j}{2} \right) \frac{\partial m_{i,j}^k}{\partial t} \\ = \left(\frac{\Delta y_{j-1} + \Delta y_j}{2} \right) \left({}_x I'_{m_{i-1,j}} \frac{m_{i-1,j}^k - m_{i,j}^k}{\Delta x_{i-1}} + {}_x I'_{T_{i-1,j}} \frac{T_{i-1,j}^k - T_{i,j}^k}{\Delta x_{i-1}} \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& - \left(\frac{\Delta y_{j-1} + \Delta y_j}{2} \right) \left({}_x I'_{m_{i,j}} \frac{m_{i,j}^k - m_{i+1,j}^k}{\Delta x_i} + {}_x I'_{T_{i,j}} \frac{T_{i,j}^k - T_{i+1,j}^k}{\Delta x_i} \right) \\
& + \left(\frac{\Delta x_{i-1} + \Delta x_i}{2} \right) \left({}_y I'_{m_{i,j-1}} \left(\frac{m_{i,j-1}^k - m_{i,j}^k}{\Delta y_{i-1}} - g \right) + {}_y I'_{T_{i,j-1}} \frac{T_{i,j-1}^k - T_{i,j}^k}{\Delta y_{i-1}} \right) \\
& - \left(\frac{\Delta x_{i-1} + \Delta x_i}{2} \right) \left({}_y I'_{m_{i,j}} \left(\frac{m_{i,j}^k - m_{i,j+1}^k}{\Delta y_i} - g \right) + {}_y I'_{T_{i,j}} \frac{T_{i,j}^k - T_{i,j+1}^k}{\Delta y_i} \right)
\end{aligned} \tag{6.12}$$

ここで、右側の下付き添え字の i と j は位置座標番号を表し、上付き添え字の k は時間ステップ番号を表す。左側の下付き添え字の x と y は水分流の向きで、 x が水平方向、 y が鉛直方向を表す。

このとき、水分伝導率、例えば ${}_x I'_{m_{i,j}}^k$ は、点 (i, j) と点 $(i+1, j)$ の中央での温度 $T_{i+1/2,j}$ および水分量 $Rh_{i+1/2,j}$ から算定されるが、それらには点 (i, j) と点 $(i+1, j)$ の温度および水分量の調和平均を用いた [49]。

$$T_{i+1/2,j}^k = \frac{2 \cdot T_{i,j}^k \cdot T_{i+1,j}^k}{(T_{i,j}^k + T_{i+1,j}^k)}, \quad Rh_{i+1/2,j}^k = \frac{2 \cdot Rh_{i,j}^k \cdot Rh_{i+1,j}^k}{(Rh_{i,j}^k + Rh_{i+1,j}^k)} \tag{6.13}$$

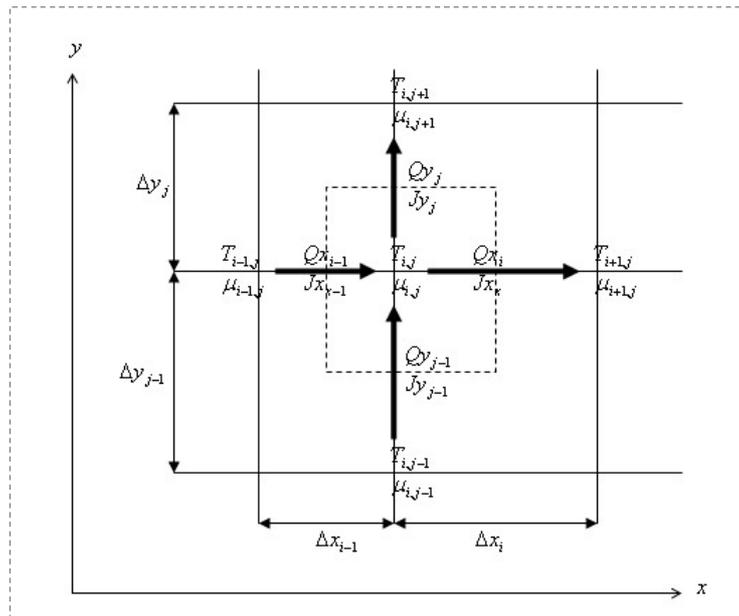


図 6.3 2次元の系の差分式における座標の概要

位置刻みは、図 6.4 に示すように水平方向が 0.5mm~2.0mm、鉛直方向が 0.1mm~2.0mm の不等分割とした。ここで、吸水面付近は変動がかなり大きいので、吸水面付近の鉛直方向の位置刻みを特に小さくしている。分割数は、水平方向が 120 (質点数 : 121 点)、鉛直方向が 57 (質点数 : 58 点) である。

このように、位置刻みが小さい場合、通常の差分式を用いた計算では時間刻みを極めて小さくする必要があり、計算時間が莫大となる。そこで、時間微分項を差分しない方法、すなわち、隣接する差分点の状態量を定数とした常微分方程式の解を用いて計算を行った [69]。その概要を次頁に示す。

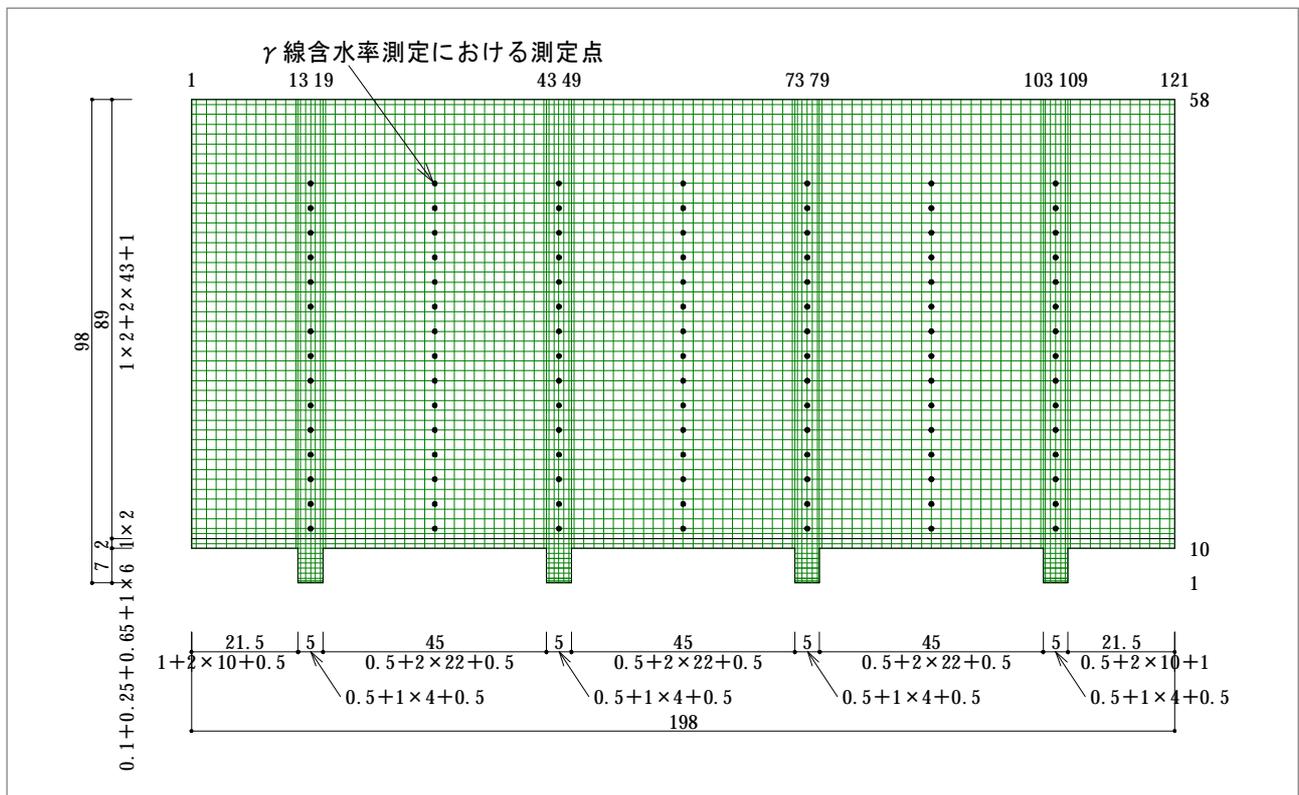


図 6.4 位置刻みの概要

(6.12)式を整理すると、

$$\begin{aligned}
& r_w \left(\frac{\partial y}{\partial m} \right)_{i,j}^k \left(\frac{\Delta x_{i-1} + \Delta x_i}{2} \right) \left(\frac{\Delta y_{j-1} + \Delta y_j}{2} \right) \frac{\partial m_{i,j}^k}{\partial t} \\
&= - \frac{{}_x I'_{m_{i-1,j}} m_{i,j}^k}{\Delta x_{i-1}} \left(\frac{\Delta y_{j-1} + \Delta y_j}{2} \right) - \frac{{}_x I'_{m_{i,j}} m_{i,j}^k}{\Delta x_i} \left(\frac{\Delta y_{j-1} + \Delta y_j}{2} \right) \\
&\quad - \frac{{}_y I'_{m_{i,j-1}} m_{i,j}^k}{\Delta y_{i-1}} \left(\frac{\Delta x_{i-1} + \Delta x_i}{2} \right) - \frac{{}_y I'_{m_{i,j}} m_{i,j}^k}{\Delta y_i} \left(\frac{\Delta x_{i-1} + \Delta x_i}{2} \right) \\
&\quad + \frac{{}_x I'_{m_{i-1,j}} m_{i-1,j}^k}{\Delta x_{i-1}} \left(\frac{\Delta y_{j-1} + \Delta y_j}{2} \right) + {}_x I'_{T_{i-1,j}} \frac{T_{i-1,j}^k - T_{i,j}^k}{\Delta x_{i-1}} \left(\frac{\Delta y_{j-1} + \Delta y_j}{2} \right) \\
&\quad + \frac{{}_x I'_{m_{i,j}} m_{i+1,j}^k}{\Delta x_i} \left(\frac{\Delta y_{j-1} + \Delta y_j}{2} \right) - {}_x I'_{T_{i,j}} \frac{T_{i,j}^k - T_{i+1,j}^k}{\Delta x_i} \left(\frac{\Delta y_{j-1} + \Delta y_j}{2} \right) \\
&\quad + \frac{{}_y I'_{m_{i,j-1}} m_{i,j-1}^k}{\Delta y_{i-1}} \left(\frac{\Delta x_{i-1} + \Delta x_i}{2} \right) + {}_y I'_{T_{i,j-1}} \frac{T_{i,j-1}^k - T_{i,j}^k}{\Delta y_{i-1}} \left(\frac{\Delta x_{i-1} + \Delta x_i}{2} \right) \\
&\quad + \frac{{}_y I'_{m_{i,j}} m_{i,j+1}^k}{\Delta y_i} \left(\frac{\Delta x_{i-1} + \Delta x_i}{2} \right) - {}_y I'_{T_{i,j}} \frac{T_{i,j}^k - T_{i,j+1}^k}{\Delta y_i} \left(\frac{\Delta x_{i-1} + \Delta x_i}{2} \right) \\
&\quad - ({}_y I'_{m_{i,j-1}} - {}_y I'_{m_{i,j}}) g \left(\frac{\Delta x_{i-1} + \Delta x_i}{2} \right)
\end{aligned} \tag{6.14}$$

ここで、

$$a1 = r_w \left(\frac{\partial y}{\partial m} \right)_{i,j}^k \left(\frac{\Delta x_{i-1} + \Delta x_i}{2} \right) \left(\frac{\Delta y_{j-1} + \Delta y_j}{2} \right) \tag{6.15}$$

$$\begin{aligned}
c1 &= - \frac{{}_x I'_{m_{i-1,j}} m_{i-1,j}^k}{\Delta x_{i-1}} \left(\frac{\Delta y_{j-1} + \Delta y_j}{2} \right) - \frac{{}_x I'_{m_{i,j}} m_{i,j}^k}{\Delta x_i} \left(\frac{\Delta y_{j-1} + \Delta y_j}{2} \right) \\
&\quad - \frac{{}_y I'_{m_{i,j-1}} m_{i,j-1}^k}{\Delta y_{i-1}} \left(\frac{\Delta x_{i-1} + \Delta x_i}{2} \right) - \frac{{}_y I'_{m_{i,j}} m_{i,j}^k}{\Delta y_i} \left(\frac{\Delta x_{i-1} + \Delta x_i}{2} \right)
\end{aligned} \tag{6.16}$$

$$\begin{aligned}
c2 &= \left(\frac{\Delta y_{j-1} + \Delta y_j}{2} \right) \left(\frac{{}_x I'_{m_{i-1,j}} m_{i-1,j}^k}{\Delta x_{i-1}} + {}_x I'_{T_{i-1,j}} \frac{T_{i-1,j}^k - T_{i,j}^k}{\Delta x_{i-1}} \right. \\
&\quad \left. + \frac{{}_x I'_{m_{i,j}} m_{i+1,j}^k}{\Delta x_i} - {}_x I'_{T_{i,j}} \frac{T_{i,j}^k - T_{i+1,j}^k}{\Delta x_i} \right) \\
&\quad + \left(\frac{\Delta x_{i-1} + \Delta x_i}{2} \right) \left(\frac{{}_y I'_{m_{i,j-1}} m_{i,j-1}^k}{\Delta y_{i-1}} + {}_y I'_{T_{i,j-1}} \frac{T_{i,j-1}^k - T_{i,j}^k}{\Delta y_{i-1}} \right)
\end{aligned}$$

$$\left. + \frac{{}_y I'_{m_{i,j}}{}^k m_{i,j+1}^k} {\Delta y_i} - {}_y I'_{T_{i,j}}{}^k \frac{T_{i,j}^k - T_{i,j+1}^k} {\Delta y_i} - ({}_y I'_{m_{i,j-1}}{}^k - {}_y I'_{m_{i,j}}{}^k) g \right) \quad (6.17)$$

とすると、(6.12) 式は常微分方程式 $a \frac{\partial m_{i,j}^k}{\partial t} = c1 \cdot m_{i,j}^k + c2$ の形となる。現時刻の $m_{i,j}^k$ を X と

において、これを解くと、

$$X = \frac{a}{c1} e^{\left(\frac{c1}{a} c_0\right)} \cdot e^{\left(\frac{c1}{a} t\right)} - \frac{c2}{c1} \quad (C_0 : \text{積分定数}) \quad (6.18)$$

ここで、 $\frac{a}{c1} e^{\left(\frac{c1}{a} c_0\right)}$ も任意の定数なので C' とすると、

$$X = C' \cdot e^{\left(\frac{c1}{a} t\right)} - \frac{c2}{c1} \quad (6.19)$$

現時刻を基準とすると、 $t=0$ と $X = m_{i,j}^k$ から、

$$C' = m_{i,j}^k + \frac{c2}{c1} \quad (6.20)$$

次時刻 $k+1$ ($t = \Delta t$) の X は $m_{i,j}^{k+1}$ なので、

$$m_{i,j}^{k+1} = \left(m_{i,j}^k + \frac{c2}{c1} \right) \cdot e^{\left(\frac{c1}{a} \Delta t\right)} - \frac{c2}{c1} \quad (6.21)$$

(6.21) 式から次時刻の水分化学ポテンシャルが求められる。

時間刻みは 1.0s とした。

なお、境界表面、特に吸水面付近での位置刻みは結果に与える影響が大きい。そこで、妥当な精度の結果が得られる刻みを検討するために、1次元の系におけるコンクリート壁体の吸水過程について数値計算を行った。

まず、位置刻みを一様に小さくした場合、水分伝導率の算定に調和平均を用いた結果と算術平均

を用いた結果は、刻みを 0.1mm にしたときに良好な一致が得られた。しかし、0.1mm で等分割すると、計算時間が数百日というオーダーとなるため、時間的な制約を考慮し、吸水面の最初の刻みを 0.1mm とした前述の不等分割刻み (0.1mm、0.25mm、0.65mm、1mm、2mm・・・) を設定した。次に、刻みを約半分 (0.1mm、0.15mm、0.15mm、0.3mm、0.3mm、0.5mm、0.5mm、1mm・・・) にした計算を、水分伝導率の算定に調和平均を用いた場合と算術平均を用いた場合について行い、それぞれの結果を比較した。各結果は、完全には一致しないが、比較的差が小さかったので、前述の不等分割の刻み (0.1mm、0.25mm、0.65mm、1mm、2mm・・・) を用いて計算を行うことにした。

また、時間刻みについても、1.0 s を用いた場合と 0.1s を用いた場合の結果を比較して決定した。

ここで、

g : 重力加速度 [9.8m/s^2]、 Rh : 相対湿度 [-]、 T : 温度 [K]、 t : 時間 [s]、 x : 位置 (x 方向) [m]、 y : 位置 (y 方向) [m]、 I'_T : 温度勾配に関する水分伝導率 [kg/msK]、 I'_m : 水分化学ポテンシャル勾配に関する水分伝導率 [kg/ms(J/kg)]、 m : 水分化学ポテンシャル [J/kg]、 r_w : 水の密度 [kg/m^3]、 y : 体積含水率 [m^3/m^3]、 Δx と Δy および Δt : 差分における位置刻み [m] および時間刻み [s]

添え字)

i : 位置の x 座標番号、 j : 位置の y 座標番号、 k : 時間ステップ番号、 x : 流れの方向 (x 方向)、 y : 流れの方向 (y 方向)

6-3 計算結果および考察

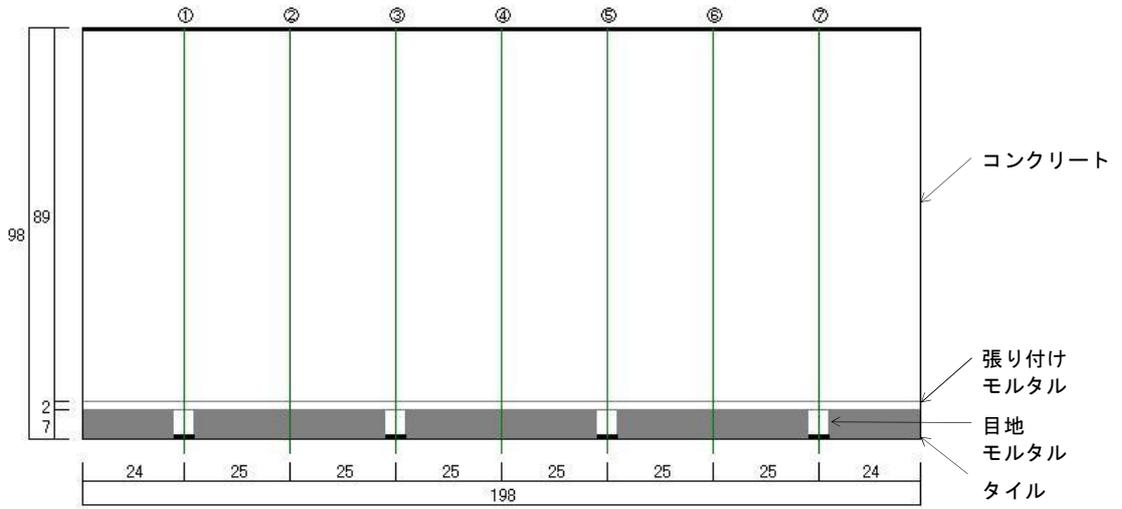
吸水開始から 3、24、120、240、480 時間後における体積含水率の平面分布の計算結果を図 6.5 (a) ~ 図 6.9 (a) に示す。図 6.5 (b) ~ 図 6.9 (b) は、同時刻における①~⑦の位置での含水率分布の計算結果を測定結果と比較したものである。なお、①~⑦は水平方向の位置を表し、①、③、⑤、⑦が吸水部位の目地の位置に、②、④、⑥が吸水部位から遠いタイルの裏側に当たる。

図 6.5 (a) ~ 図 6.9 (a) に示す計算結果のみに注目すると、吸水開始から 120 時間経過したあたりから、目地モルタルと張り付けモルタルとの界面付近の含水率が上昇し始め(図 6.7 (a))、コンクリート部分の含水率が上昇し始めるのは、吸水開始から 240 時間経過した頃からである(図 6.8 (a))。また、含水率の上昇は目地がある部分(①、③、⑤、⑦)に限られ、タイルの裏側(②、④、⑥)では見られない。

図 6.5 (b) ~ 図 6.9 (b) に示す測定結果と計算結果との比較から、含水率の上昇が明確に見られた試験体 No1 (図中の●) および試験体 No3 (図中の▲) については、水分移動の様相が測定結果と計算結果とでかなり異なり、全般的に含水率は測定結果の方が大きい。

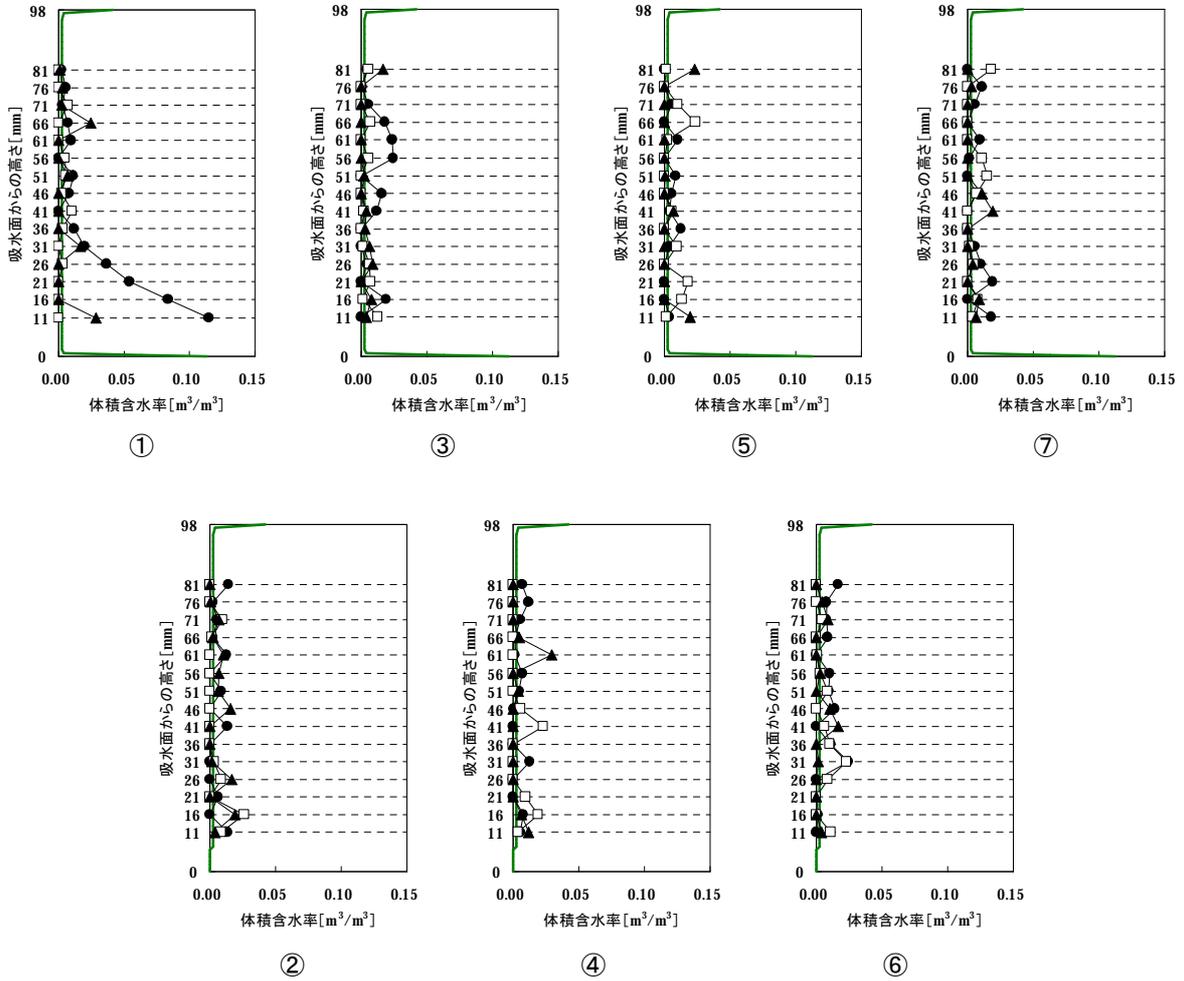
他の試験体に比べて含水率の上昇が小さかった試験体 No2 (図中の□) については、吸水開始から 120 時間経過後までは目地の位置①、③、⑤、⑦において、計算結果よりも測定結果の方が含水率はやや大きいものの(図 6.5 (b) ~ 図 6.7 (b))、240 時間後および 480 時間後の比較(図 6.8 (b) および図 6.9 (b)) やタイル裏側②、④、⑥での比較を見ると、水分移動の様相は類似している。

以上から、吸水実験に用いた試験体 No1 および試験体 No3 の水分伝導率は、本計算で用いた水分伝導率よりもかなり大きいと考えられる。一方、試験体 No2 については、水分伝導率を見直すことにより、計算結果と測定結果との間に良好な一致が得られる可能性が高いと考えられる。



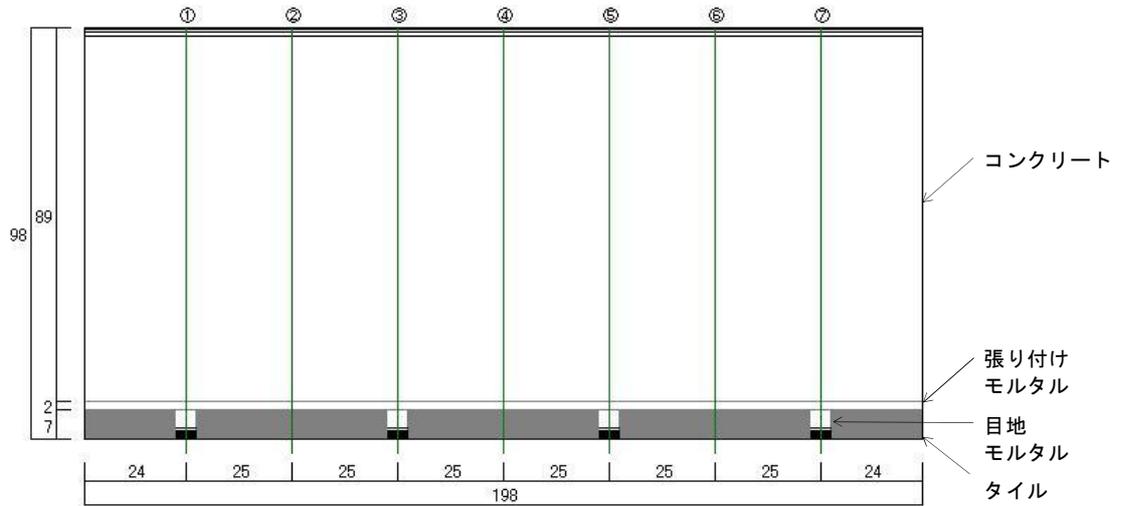
(a) 平面分布

太線：計算結果、細線とシンボル：測定結果 (●：試験体 No1 □：試験体 No2 ▲：試験体 No3)

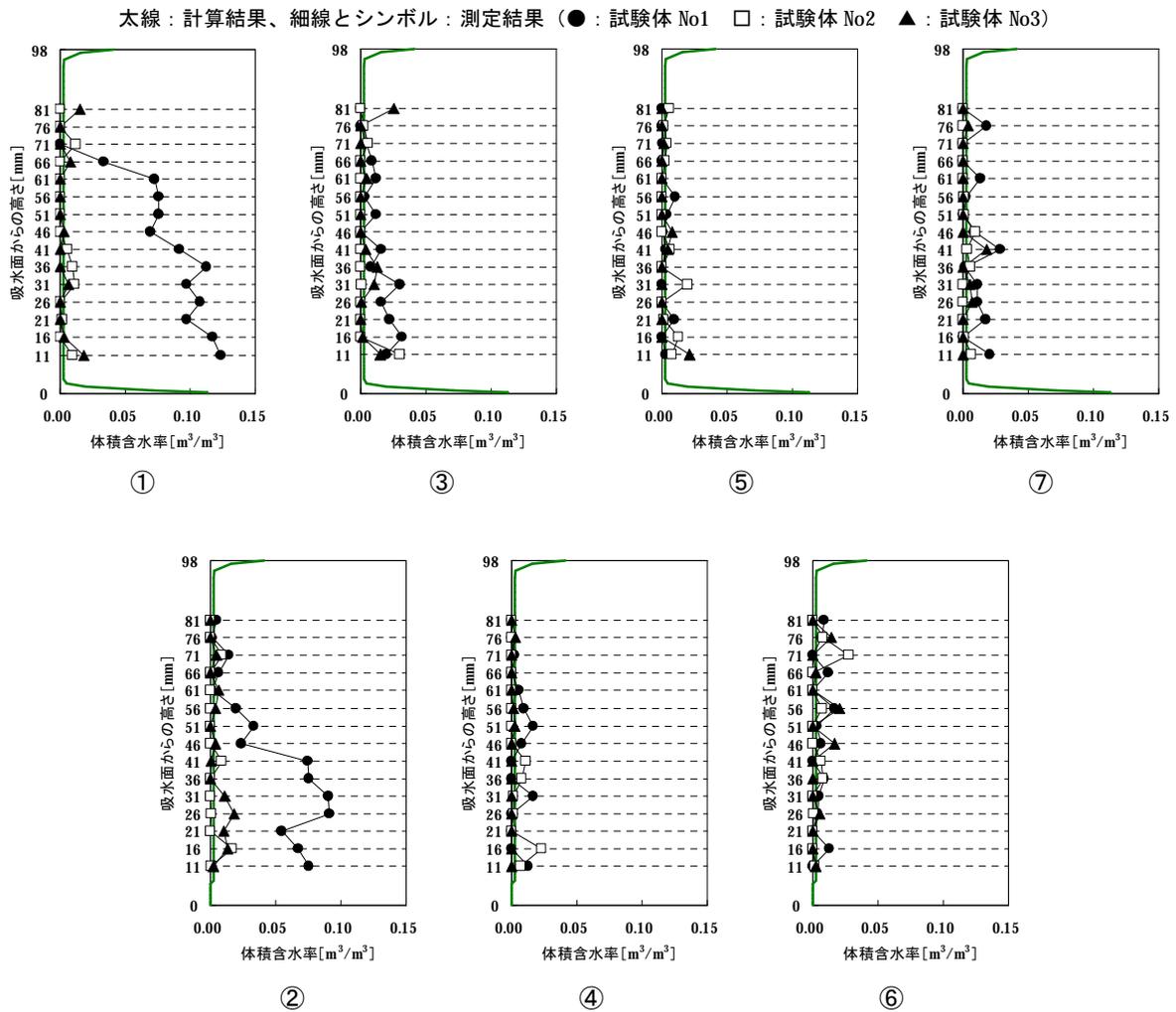


(b) ①～⑦の位置における含水率分布と測定結果との比較

図 6.5 吸水開始 3 時間後の計算結果

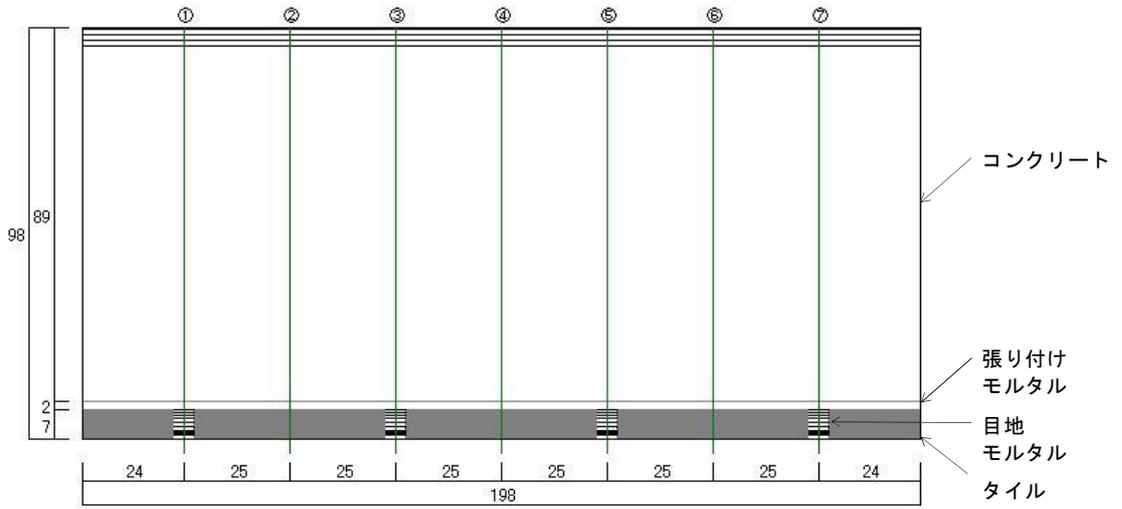


(a) 平面分布



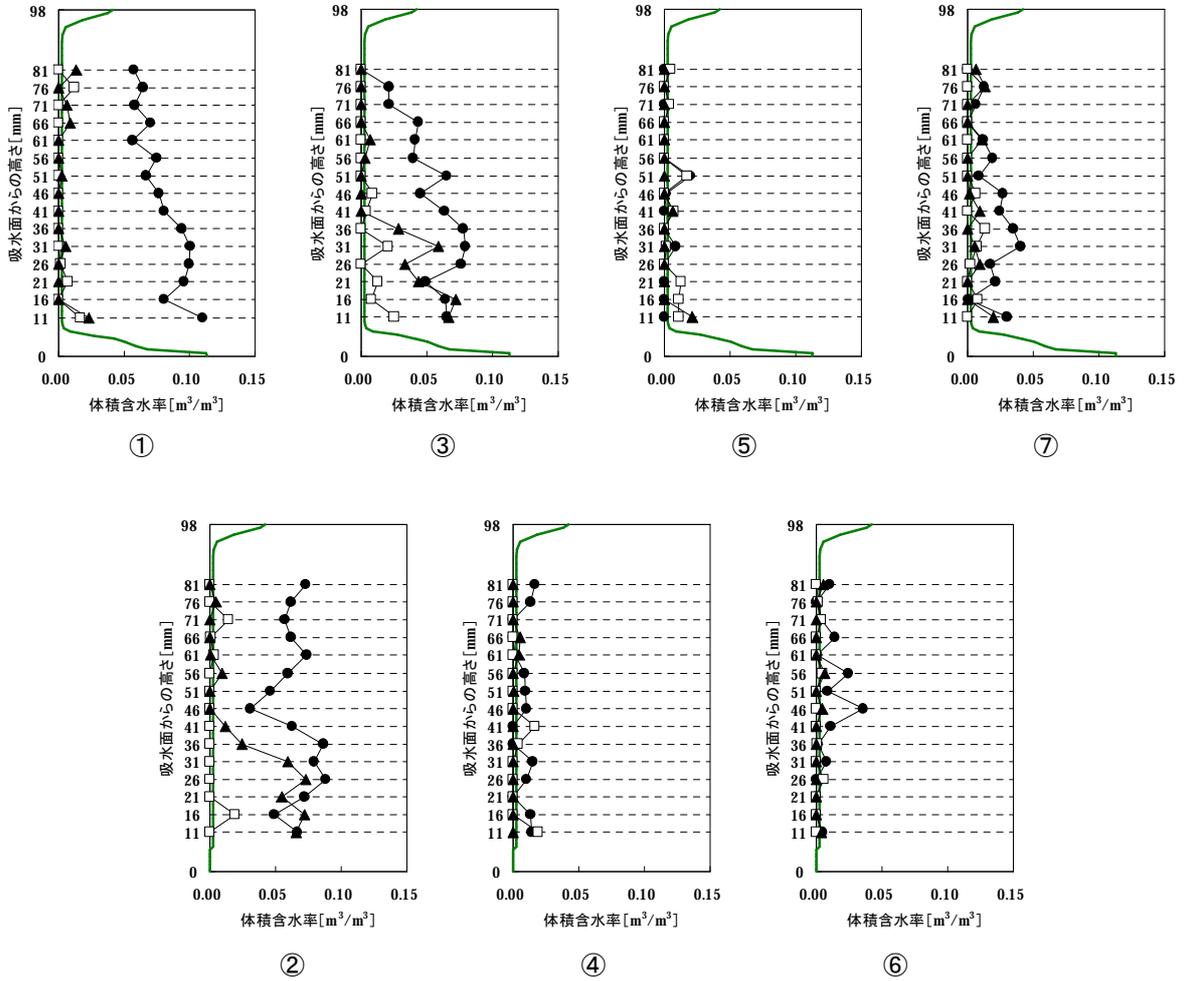
(b) ①～⑦の位置における含水率分布と測定結果との比較

図 6.6 吸水開始 24 時間 (1 日) 後の計算結果



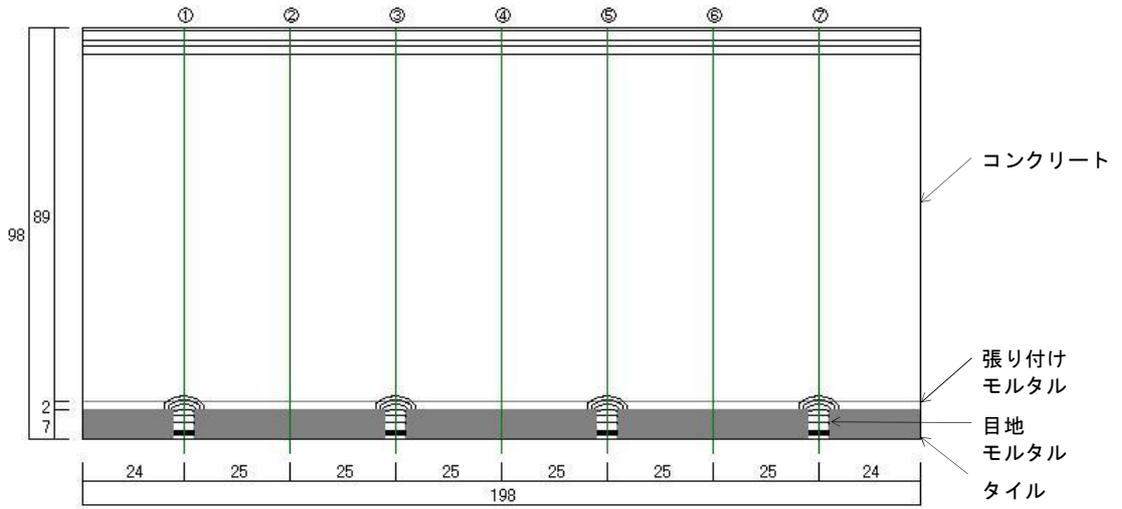
(a) 平面分布

太線：計算結果、細線とシンボル：測定結果 (●：試験体 No1 □：試験体 No2 ▲：試験体 No3)



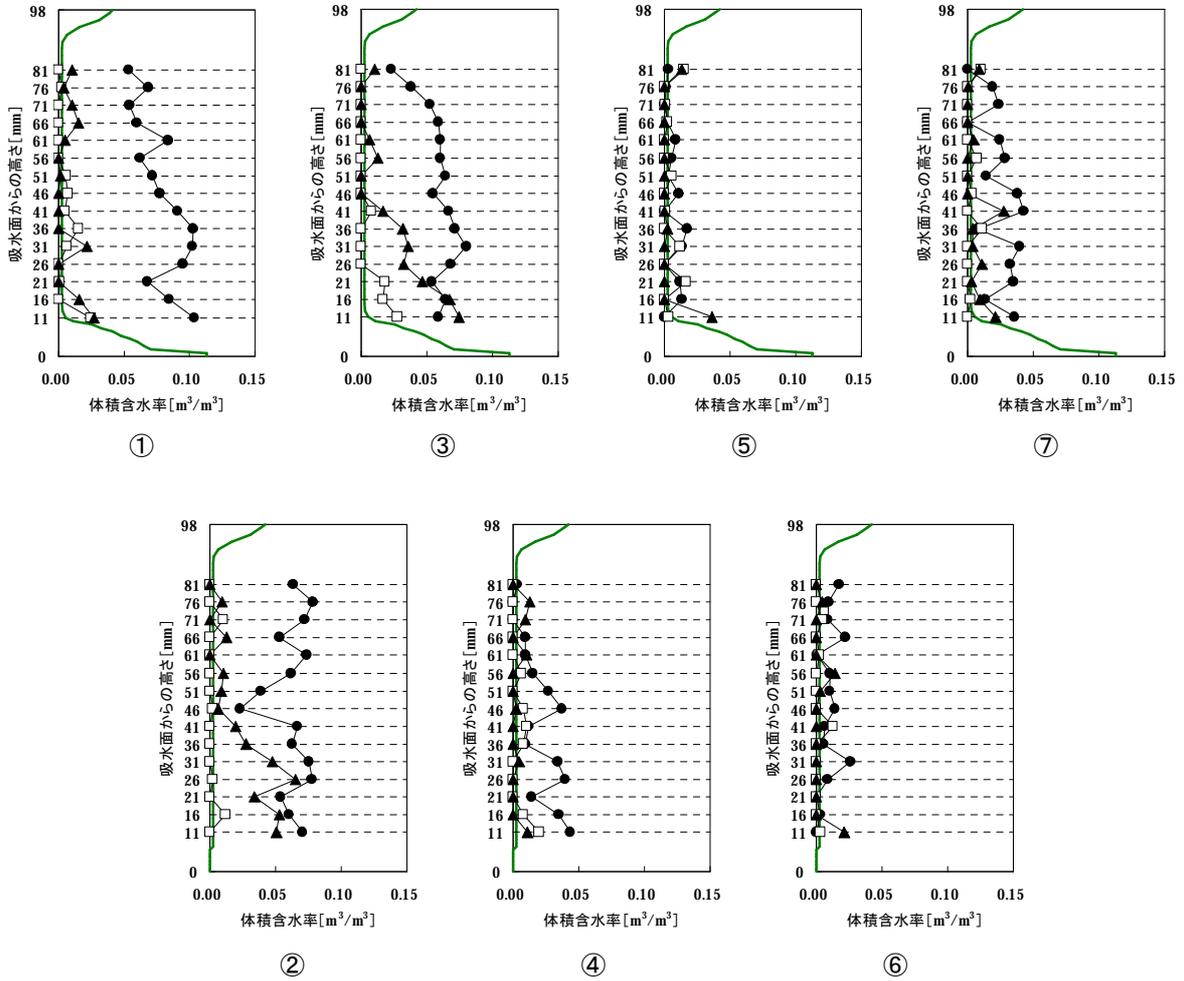
(b) ①～⑦の位置における含水率分布と測定結果との比較

図 6.7 吸水開始 120 時間 (5 日) 後の計算結果



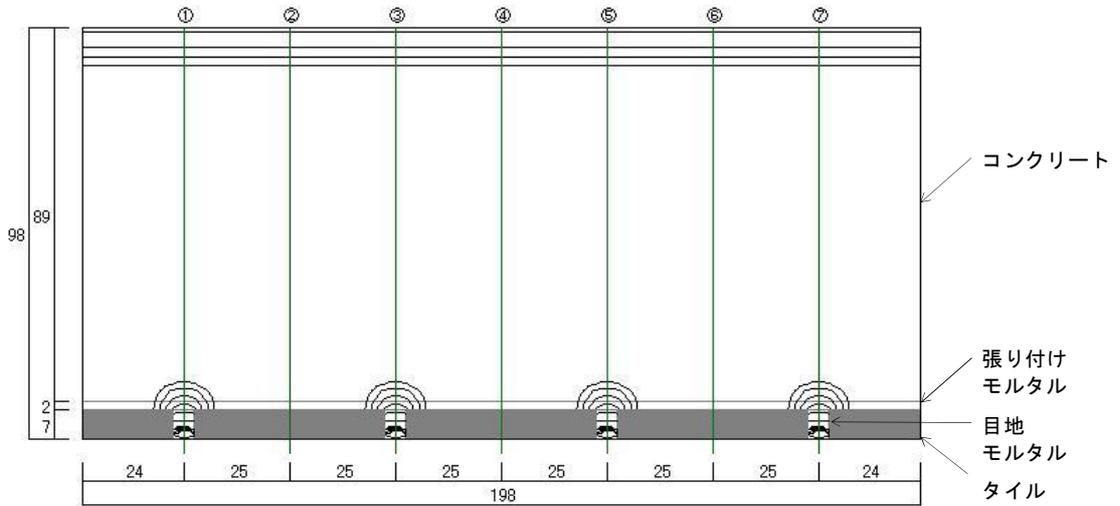
(a) 平面分布

太線：計算結果、細線とシンボル：測定結果 (●：試験体 No1 □：試験体 No2 ▲：試験体 No3)

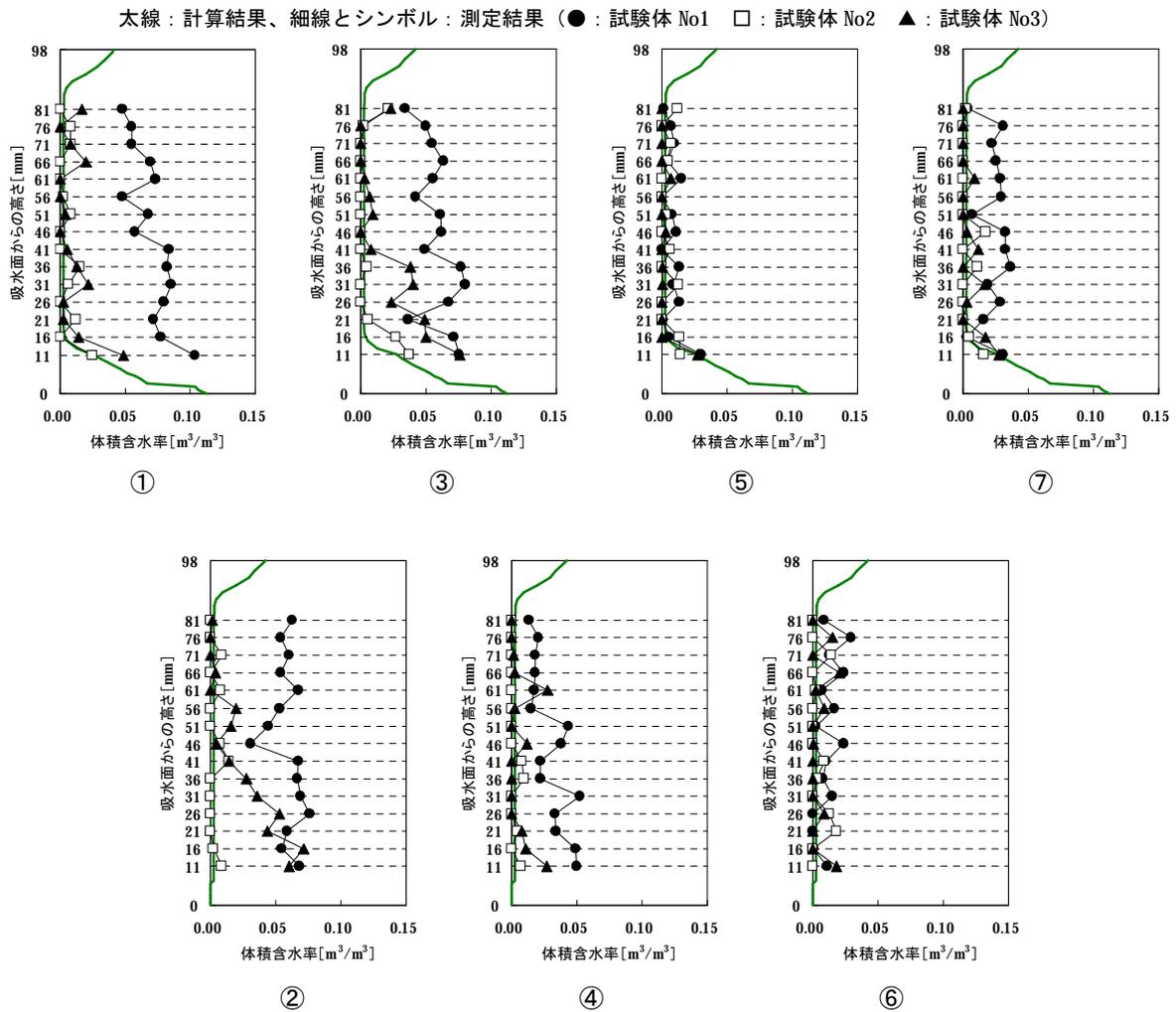


(b) ①～⑦の位置における含水率分布と測定結果との比較

図 6.8 吸水開始 240 時間 (10 日) 後の計算結果



(a) 平面分布



(b) ①～⑦の位置における含水率分布と測定結果との比較

図 6.9 吸水開始 480 時間 (20 日) 後の計算結果

6-4 本章のまとめ

本章では、タイル張り仕上げが施されたコンクリート試験体の吸水過程における含水率変動について、熱水分同時移動方程式（第2章）による数値計算を行い、その結果を吸水実験結果（第4章）と比較した。

吸水量が多く、含水率の上昇が大きかった試験体 No1 および試験体 No3 については、測定結果と計算結果との間に良好な一致が見られなかった。しかしながら、含水率の上昇が小さかった試験体 No2 については、測定結果の方が計算結果よりも若干数値が大きいものの、移動性状に関して類似した結果が得られた。

【本章に関連する発表論文】

[2.7] 安井、銚井、松下、恩村、小椋、小南：「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（関東）、pp.339～340、2006.9

[2.8] 恩村、銚井、松下、小椋、小南、安井：「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6 解析に用いた値が結果に及ぼす影響」、日本建築学会大会学術講演梗概集（九州）、pp.361～362、2007.8

[3.6] 安井、銚井、松下、恩村、小椋、小南：「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」、平成18年度日本建築学会近畿支部研究報告集、pp.337～340、2006.6

[3.7] 恩村、銚井、松下、小椋、小南、安井：「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6 解析に用いた値が結果に及ぼす影響」、平成19年度日本建築学会近畿支部研究報告集、pp.161～164、2007.6

第7章 強度の違いと物性値のばらつきが水分浸透に及ぼす影響

7-1 はじめに

前章の解析の結果、吸水実験に用いた3体の試験体のうちの1体（試験体 No2）については、測定結果と類似した計算結果が得られた。よって、水分伝導率を詳細に検討することで、計算結果と測定結果との間に良好な一致が得られる可能性が高いと考えられる。

前章の解析に用いた水分伝導率は、実強度が 38.6N/mm^2 のコンクリートにおける熱湿気物性の測定結果から推定したもので、吸水実験に用いたコンクリートの実強度は 27.9N/mm^2 であった。第3章に示した知見「強度が高くなるほど湿気伝導率および透水係数は小さくなる傾向にある」から、吸水実験に用いたコンクリートの湿気伝導率や透水係数はもっと大きかった可能性が高い。また、第3章に示した測定結果では、湿気伝導率、透水係数、平衡含水率は測定値の平均に対してそれぞれ0.7~1.3倍、0.5~1.5倍、0.8~1.2倍のばらつきを有していた。

本章では、これらの情報を基に水分伝導率を改めて推定する。その値を用いて前章と同様の計算を行う。

7-2 水分伝導率および平衡含水率曲線の検討

図 7.1 は、実強度と水セメント比との関係を示したもので、両者は比例関係にある。この関係から、吸水実験に用いたコンクリートの水セメント比として 69.4% が算出される。

図 7.2 は、水セメント比と透水係数との関係を示したもので、測定値のばらつき（平均値に対して 0.5~1.5 倍）を考慮して妥当と考えられる近似方法を用いて推定すると、吸水実験に用いたコンクリートの透水係数の値として、最大で $16.2 \times 10^{-11} \text{m/s}$ 、最小で $2.0 \times 10^{-11} \text{m/s}$ が算出される。

図 7.3 は、強度と湿気伝導率（液相を含む）との関係を示したもので、この関係から吸水実験に用いたコンクリートの相対湿度 33% における湿気伝導率は $1.15 \times 10^{-12} \text{kg/msPa}$ 、相対湿度 91.5% における湿気伝導率は $7.45 \times 10^{-12} \text{kg/msPa}$ と算出される。実強度 38.6N/mm^2 のコンクリートにおける測定結果に対しては、それぞれ 1.37 倍、1.29 倍である。この平均（1.33 倍）を用いて湿気伝導率（平均）を決定した。さらに、測定値のばらつき（平均値に対して 0.76~1.28 倍）を考慮すると、吸水実験に用いたコンクリートの湿気伝導率の最大・最小として表 7.1 に示す値（図 7.4 も参照）が算出される。

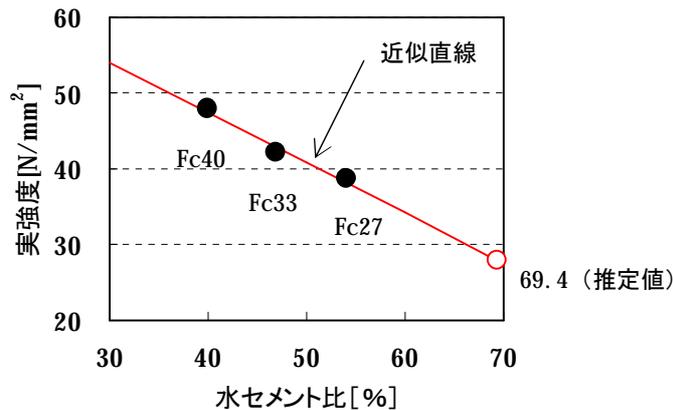


図 7.1 実強度と水セメント比との関係

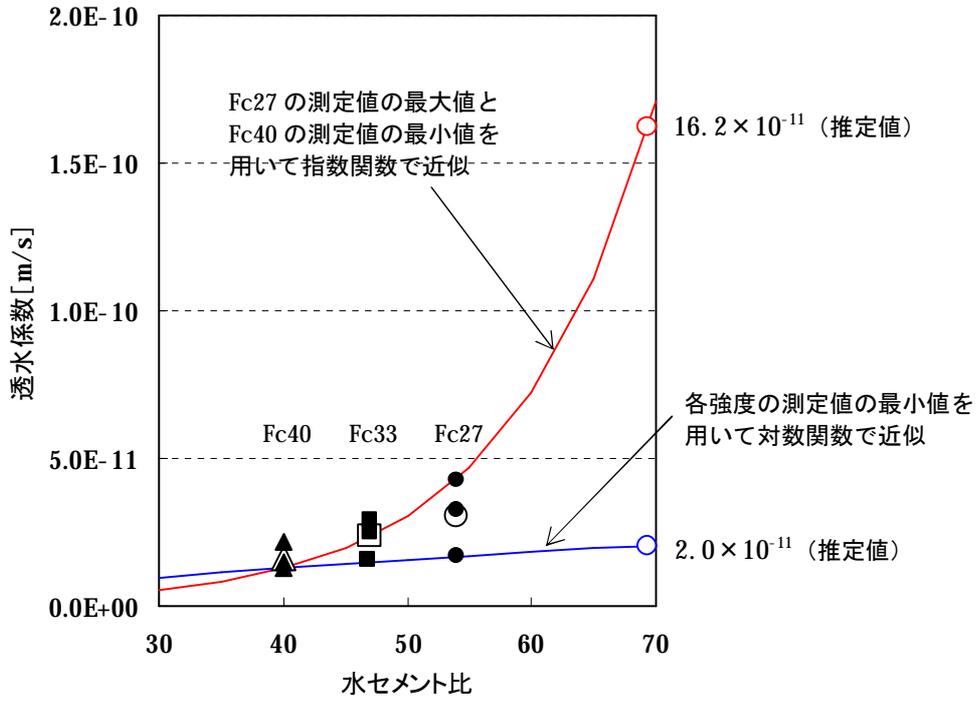


図 7.2 水セメント比と透水係数との関係
 ※小さいシンボルが測定値を、大きいシンボルが平均値を示す。

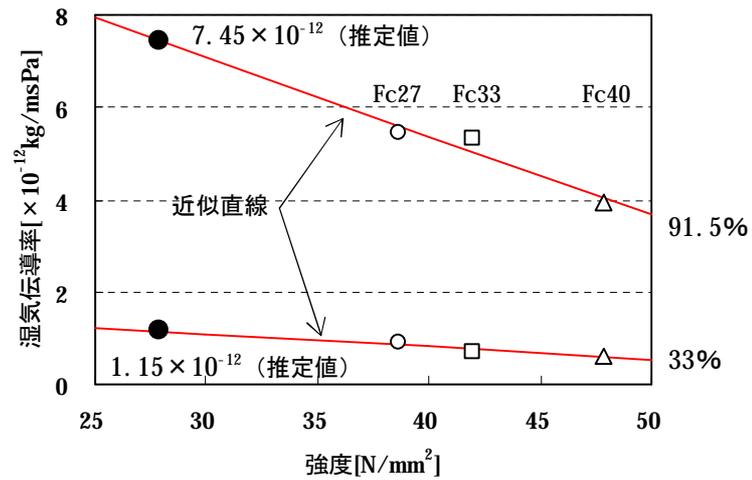


図 7.3 強度と湿気伝導率（液相を含む）との関係
 ※白抜きのシンボルが測定値（平均）を示す。

表 7.1 湿気伝導率（液相を含む）の推定

相対湿度 [%]	33.0	44.0	65.0	74.5	91.5
①38.6N/mm ² のコンクリートにおける測定結果（平均） [$\times 10^{-12}$ kg/msPa]	0.90	1.25	1.50	1.61	5.43
②27.9N/mm ² のコンクリートにおける推定値（平均）（①の 1.33 倍） [$\times 10^{-12}$ kg/msPa]	1.20	1.66	2.00	2.14	7.22
③低い方のばらつきを考慮（②の 0.75 倍） [$\times 10^{-12}$ kg/msPa]	0.90	1.25	1.50	1.61	5.42
④高い方のばらつきを考慮（②の 1.25 倍） [$\times 10^{-12}$ kg/msPa]	1.50	2.08	2.50	2.68	9.03

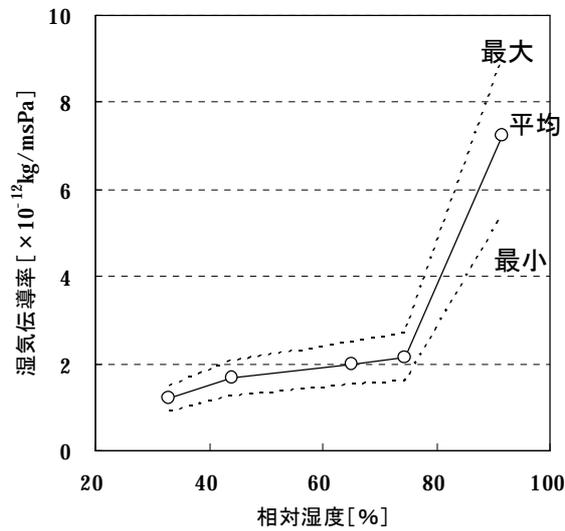


図 7.4 湿気伝導率（液相を含む）の推定

第 5 章において気相のみの湿気伝導率 $I' = C_1(\Phi - y)/\Phi$ を定義したが、図 7.5 は強度とパラメータ C_1 の関係を示したもので、この関係から吸水実験に用いたコンクリートの C_1 として 1.37×10^{-12} kg/msPa が算出される。

図 7.6 は強度と空隙率との関係を示したもので、この関係から吸水実験に用いたコンクリートの空隙率として 0.1105 が算出され、気相のみの湿気伝導率が図 7.7 のように推定される。

これらの値を用いて、第 5 章で示した方法により、吸水実験に用いたコンクリートの水分伝導率として考えられる最大値と最小値を推定した。その結果を図 7.8 に示す。なお、水分伝導率の最小値の推定においては、 C_1 に 1.37×10^{-12} を用いると低湿度域で $I'_{m_2} > I'_m$ になってしまうので、この場合、 C_1 は変えていない (1.0×10^{-12} を使用)。

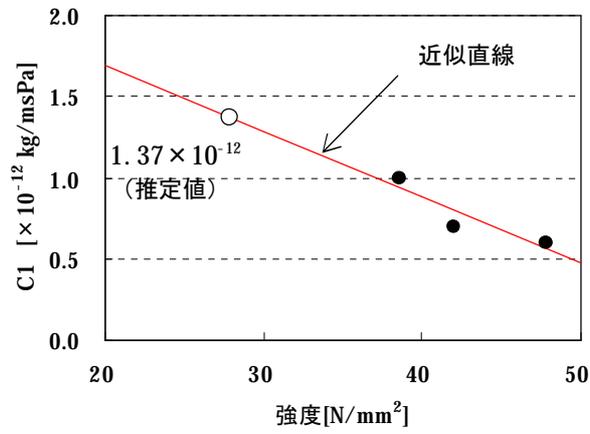


図 7.5 強度とパラメータ C_1 との関係

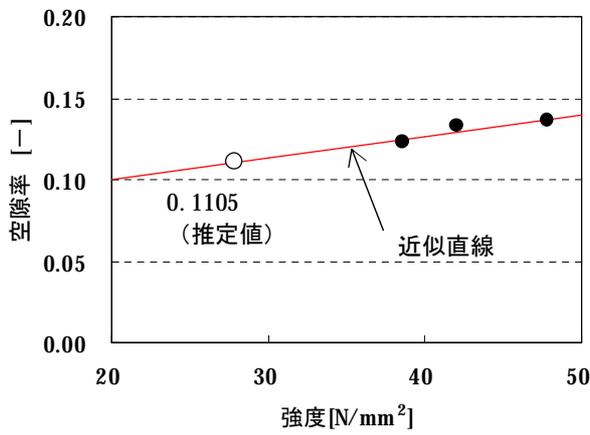


図 7.6 強度と空隙率との関係

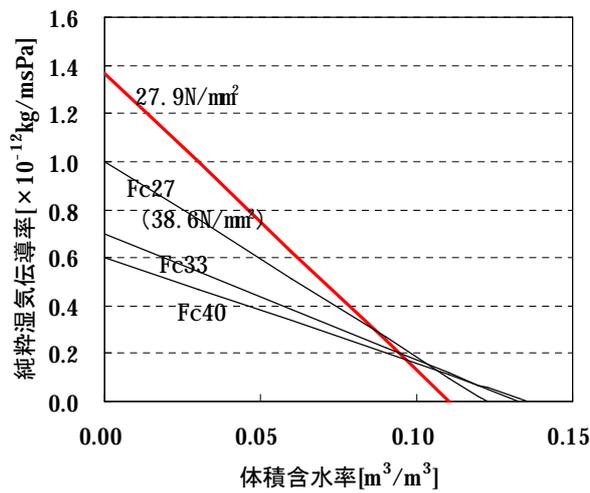


図 7.7 湿気伝導率（気相のみ）の推定

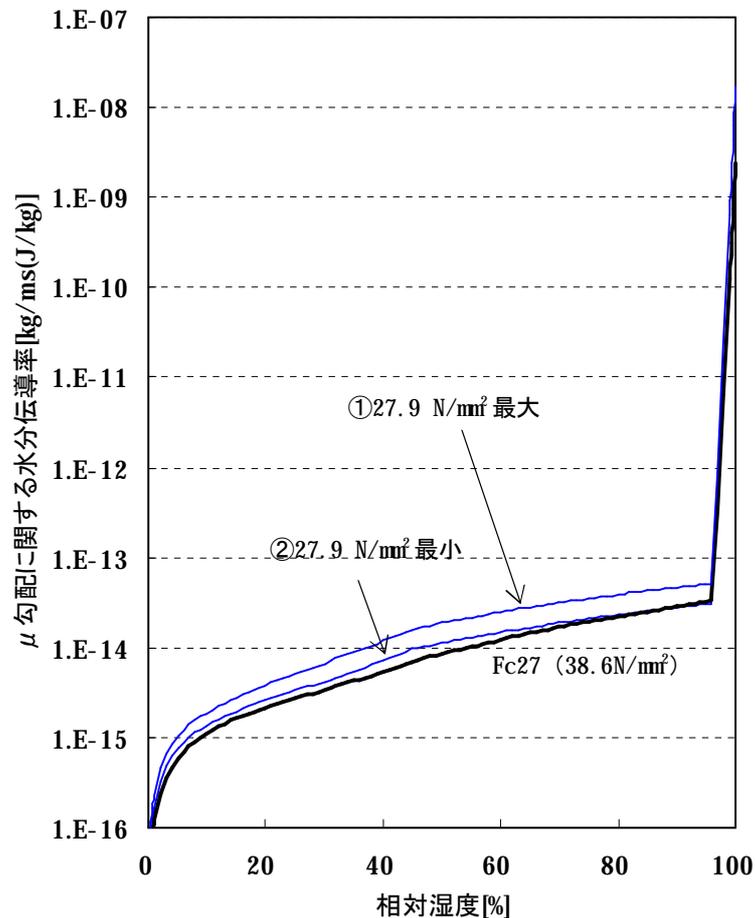


図 7.8 吸水実験に用いたコンクリートの水分伝導率の推定結果

平衡含水率については、強度との間に明確な相関が見られなかった。ただし、平衡含水率関係を表す関数の傾きは計算結果に大きく影響する。図 7.9 は平衡含水率の測定結果を示すが、この図のように相対湿度 32.8%と 95.8%における測定値（平均）に対して 0.8~1.2 倍のばらつきを用いて、最も傾きが急になる場合と緩くなる場合の 2 種類の近似直線を考えた。

ここでは、水分伝導率を最大（図 7.8 の①）または最小（図 7.8 の②）に変えた場合と、平衡含水率の傾きを急勾配（図 7.9 の a）、または緩勾配（図 7.9 の b）に変えた場合とを組み合わせて計算を行う。計算条件を表 7.2 に示す。

その他の解析条件は前章の解析と同じである。また、計算結果と測定結果との比較は、前章の解析で計算結果が測定結果と類似した試験体 No2 の測定結果との比較だけにとどめる。

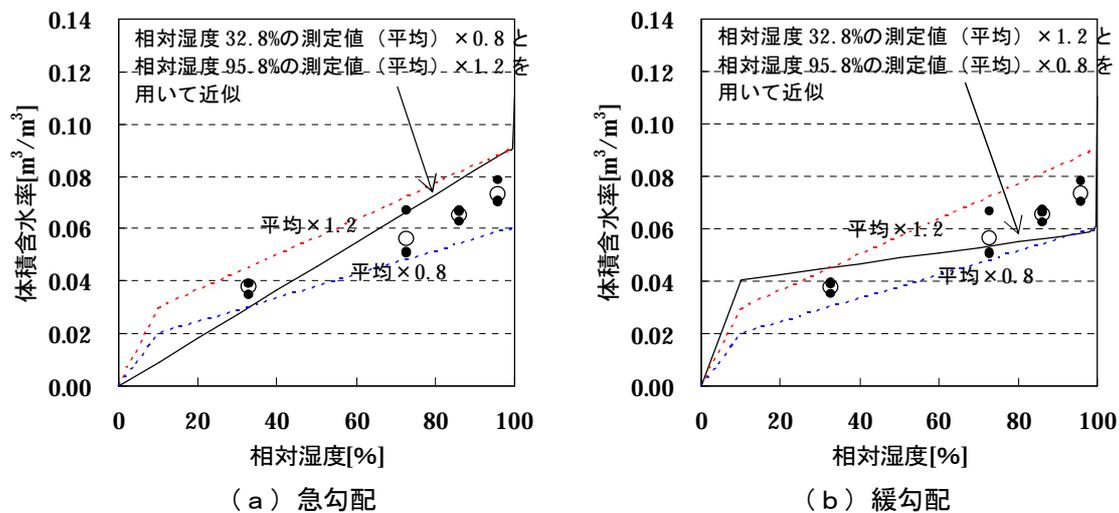


図 7.9 平衡含水率曲線の推定
 ※小さいシンボルが測定値を、大きいシンボルが平均値を示す。

表 7.2 計算条件

名称	水分伝導率	平衡含水率曲線
Cal-1	最大 (図 7.8 の①)	急勾配 (図 7.9 の a)
Cal-2	最大 (図 7.8 の①)	緩勾配 (図 7.9 の b)
Cal-3	最小 (図 7.8 の②)	急勾配 (図 7.9 の a)
Cal-4	最小 (図 7.8 の②)	緩勾配 (図 7.9 の b)

7-3 計算結果および考察

図 7.10～図 7.14 に含水率変動の計算結果を示す。

吸水開始 3 時間後では、まだ計算条件の違いによる差はほとんど見られないが、比較的早い時刻から差が現れ始め、時間の経過とともにその差は顕著になっていく。

水分移動が最も速い（含水率が早く上昇する）のは水分伝導率の大きい Cal-1 で、水分伝導率の小さい Cal-4 が最も遅い。この結果から、水分伝導率の大きさの違いが、水分の移動速度に直接影響していることが分かる。

一方、平衡含水率曲線の傾きの違いの影響は含水率の分布性状に見られる。傾きが急な場合、含水率分布は比較的なだらかであるが、傾きが緩やかな場合は分布に粗の部分と密な部分が見られる。含水率分布の形状に注目した場合、それが平衡含水率曲線の形状と類似していることが分かる。例

えば、**図 7.14 (b)** において、目地位置 (①、③、⑤、⑦) の Cal-3 および Cal-4 の計算結果では、含水率が急に変化する点が 2 ヶ所見られるが、これは**図 7.9 (b)** で示した平衡含水率曲線に勾配が急に変化する点が 2 ヶ所見られることに対応する。

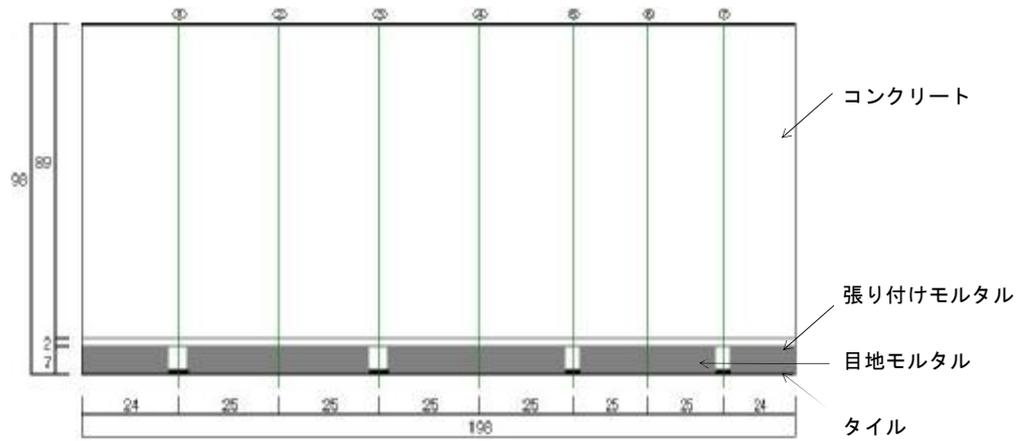
計算結果と試験体 No2 の測定結果との比較では、吸水面から離れた位置 (高い位置) で測定結果の含水率が計算結果よりも大きい場合が数箇所に見られるが、これは測定誤差と考えられる。また、吸水面からの高さが 26mm 以下の範囲に注目すると、前章の解析結果と測定結果が一致しなかった場合の多くにおいては、測定結果は計算結果の範囲内に含まれている。

図 7.15 に吸水量の比較を示す。最も吸水量が多いのは Cal-2 であり、最も吸水量が少ないのは Cal-3 である。吸水量についても測定結果は計算結果の範囲内に含まれている。

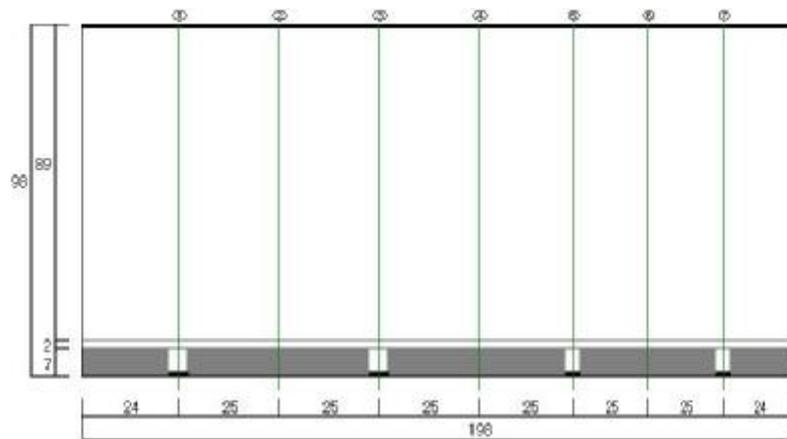
すなわち、試験体 No2 の水分伝導率および平衡含水率の値は、ここで推測した値の範囲内であった可能性が高いと言える。

また、本章の解析のように強度の違いや物性値のばらつきを考慮することにより、含水率や吸水量が取りうる範囲が求められるので、それを前提に壁体設計を行えば良い。

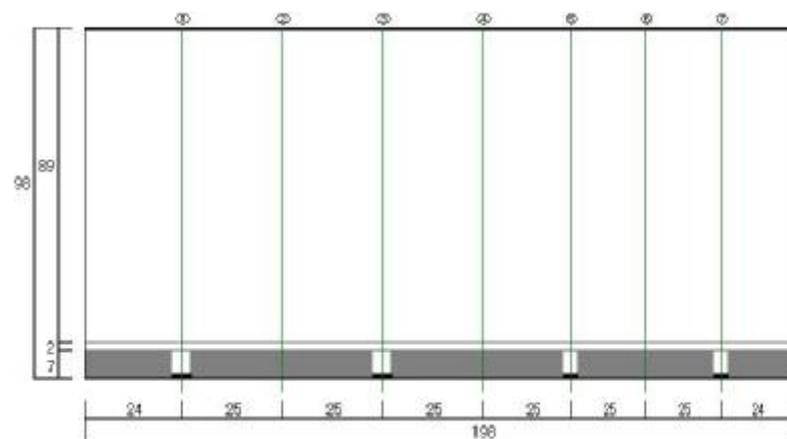
以上から、強度の違いや物性値のばらつきを考慮に入れる必要があるが、コンクリート壁体の水分移動性状については、第 3 章の測定結果を用いた解析によって十分な精度で予測が行えると考えられる。



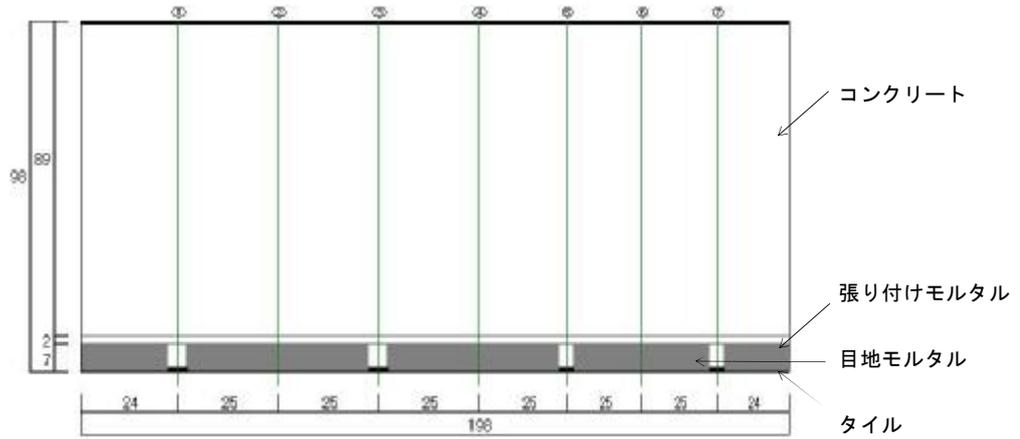
① Cal-1 (水分伝導率：大、平衡含水率曲線：急勾配)



② Cal-2 (水分伝導率：大、平衡含水率曲線：緩勾配)



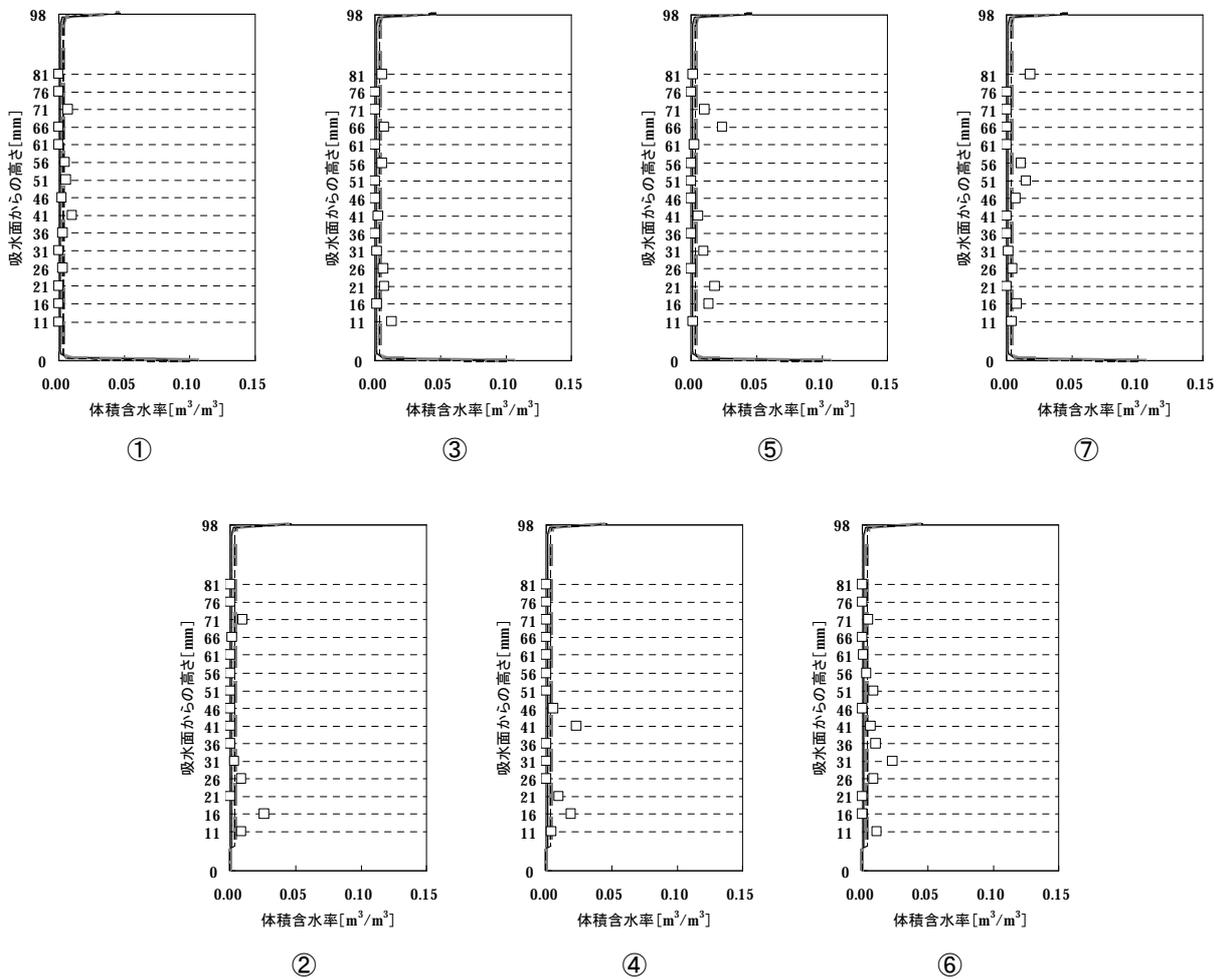
③ Cal-3 (水分伝導率：小、平衡含水率曲線：急勾配)



④ Cal-4 (水分伝導率：小、平衡含水率曲線：緩勾配)

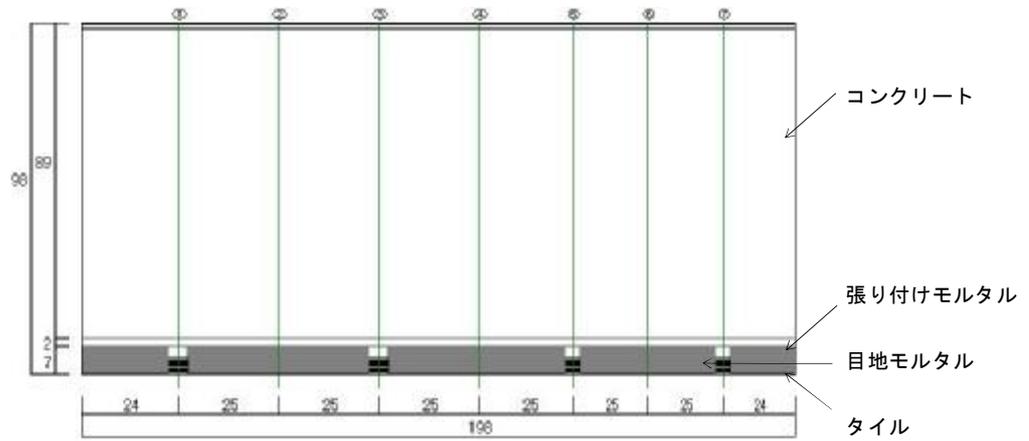
(a) 平面分布

太実線：Cal-1の計算結果、太点線：Cal-2の計算結果、細実線：Cal-3の計算結果、細点線：Cal-4の計算結果
 シンボル：試験体 No2 の測定結果

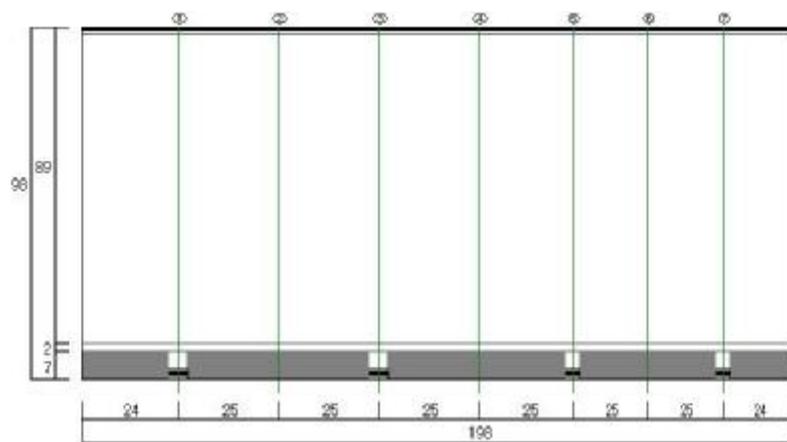


(b) ①～⑦の位置における含水率分布と測定結果 (試験体 No2) との比較

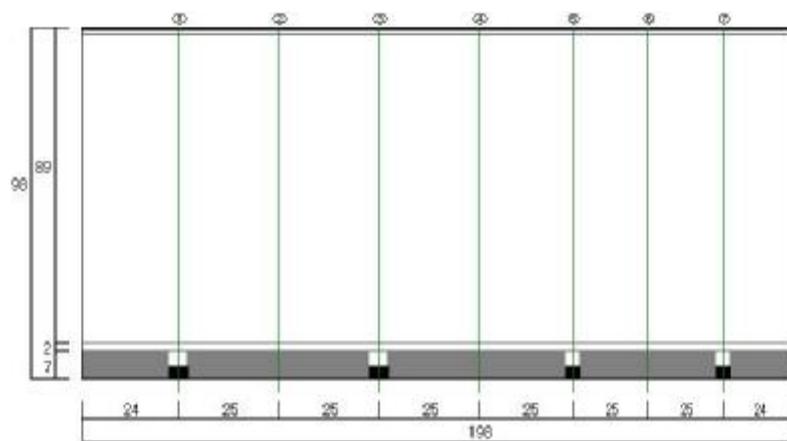
図 7.10 吸水開始 3 時間後の計算結果 (強度の違い・物性値のばらつきを考慮した場合)



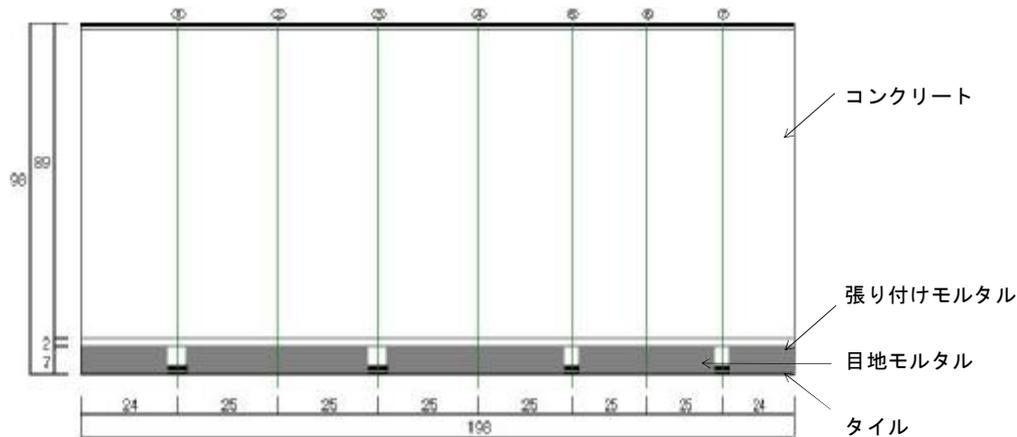
① Cal-1 (水分伝導率: 大、平衡含水率曲線: 急勾配)



② Cal-2 (水分伝導率: 大、平衡含水率曲線: 緩勾配)



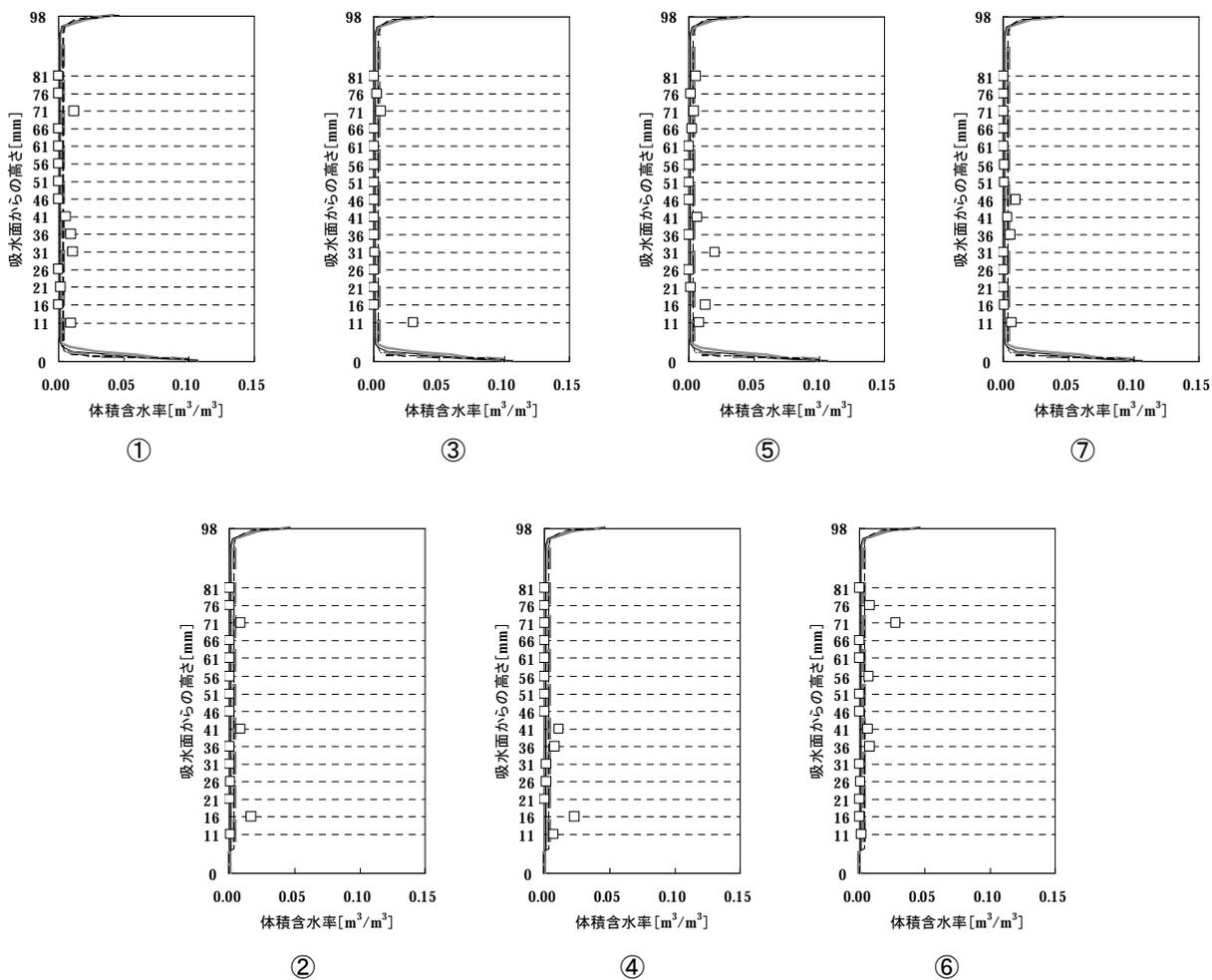
③ Cal-3 (水分伝導率: 小、平衡含水率曲線: 急勾配)



④ Cal-4 (水分伝導率：小、平衡含水率曲線：緩勾配)

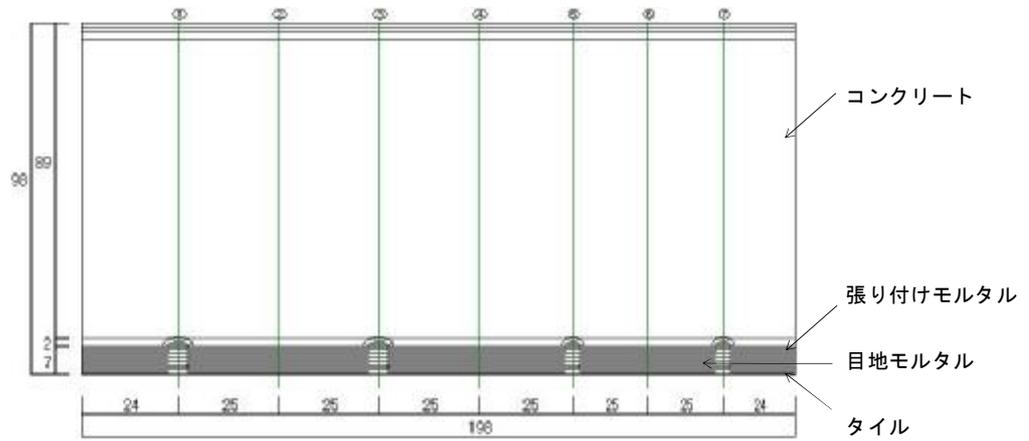
(a) 平面分布

太実線：Cal-1の計算結果、太点線：Cal-2の計算結果、細実線：Cal-3の計算結果、細点線：Cal-4の計算結果
 シンボル：試験体 No2 の測定結果

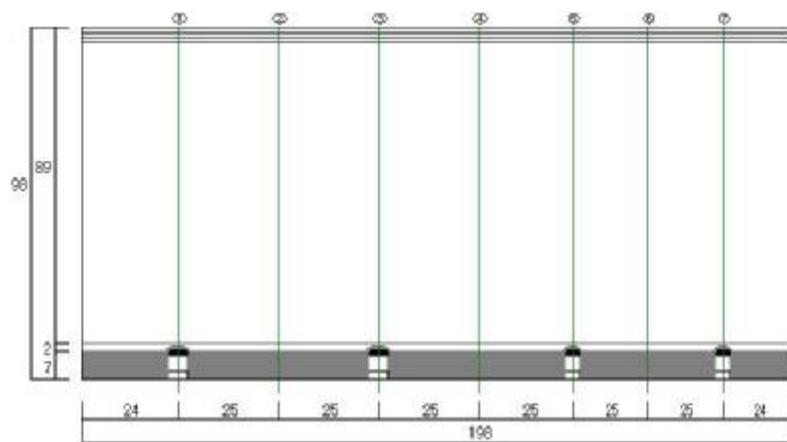


(b) ①～⑦の位置における含水率分布と測定結果 (試験体 No2) との比較

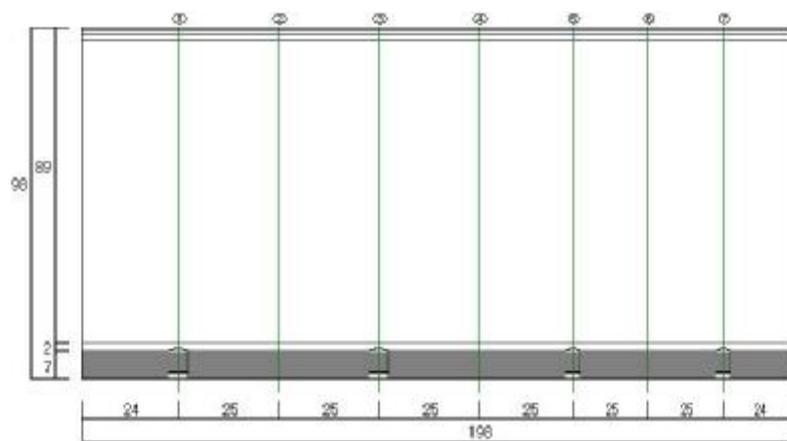
図 7.11 吸水開始 24 時間 (1 日) 後の計算結果 (強度の違い・物性値のばらつきを考慮した場合)



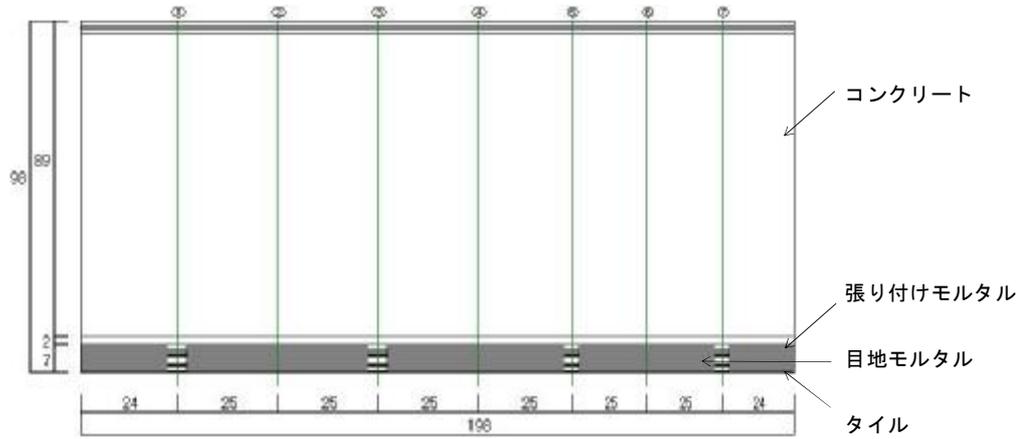
① Cal-1 (水分伝導率：大、平衡含水率曲線：急勾配)



② Cal-2 (水分伝導率：大、平衡含水率曲線：緩勾配)



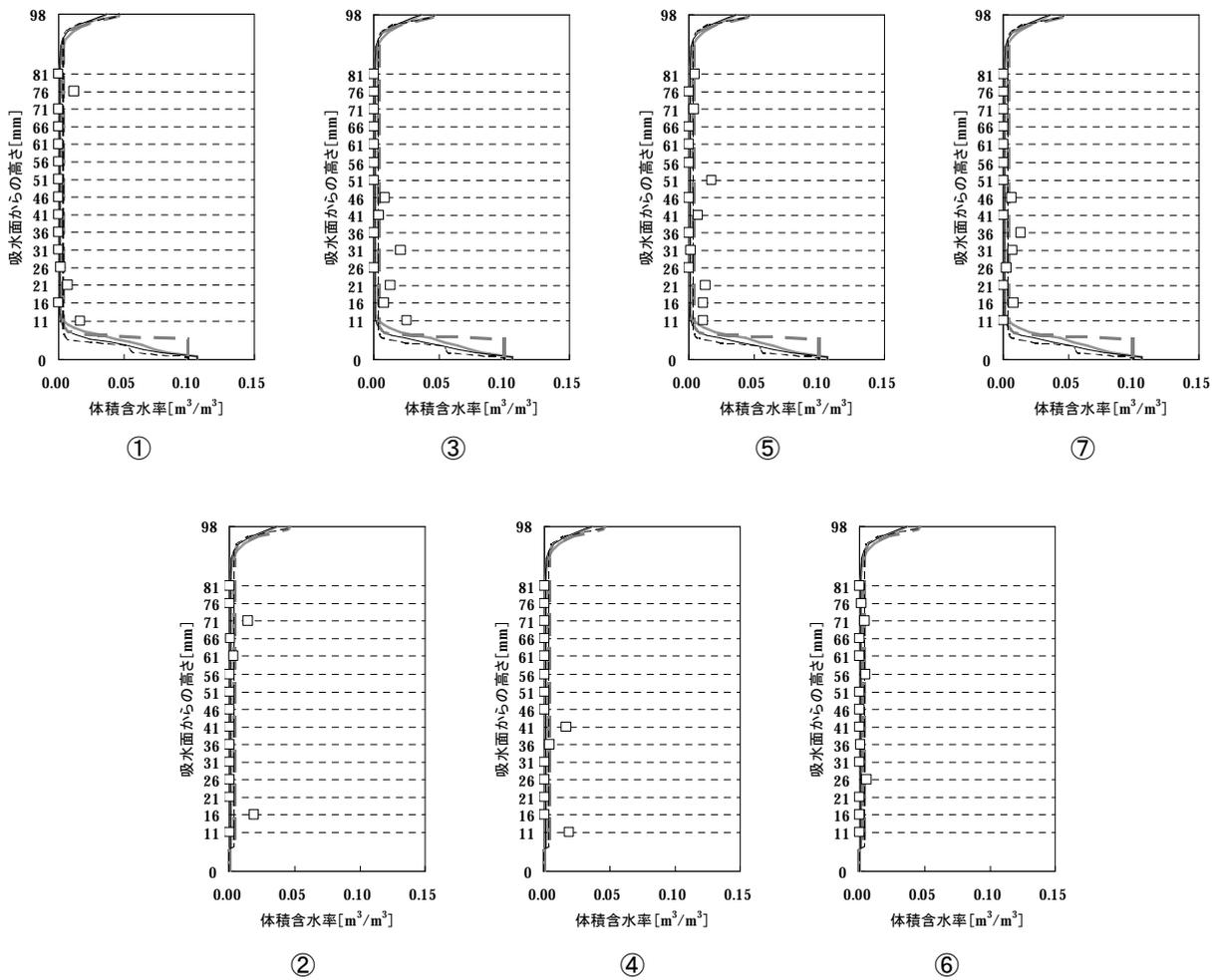
③ Cal-3 (水分伝導率：小、平衡含水率曲線：急勾配)



④ Cal-4 (水分伝導率：小、平衡含水率曲線：緩勾配)

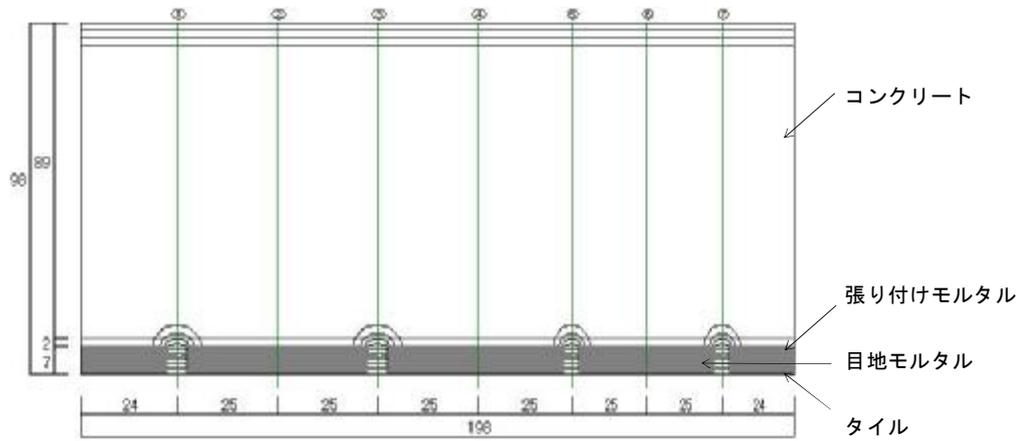
(a) 平面分布

太実線：Cal-1の計算結果、太点線：Cal-2の計算結果、細実線：Cal-3の計算結果、細点線：Cal-4の計算結果
 シンボル：試験体 No2 の測定結果

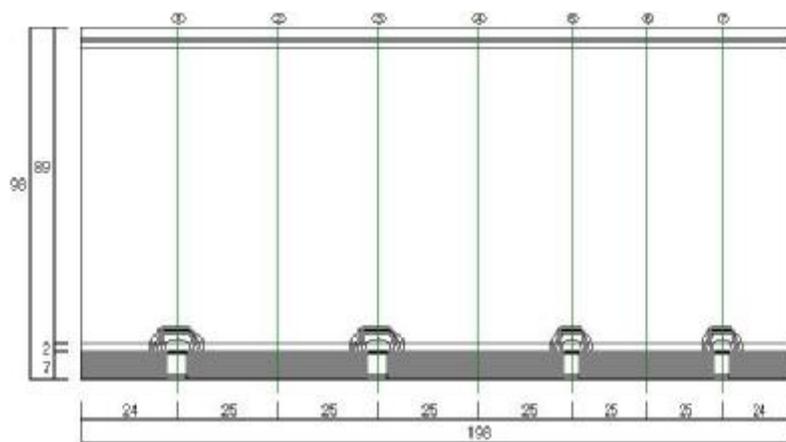


(b) ①～⑦の位置における含水率分布と測定結果 (試験体 No2) との比較

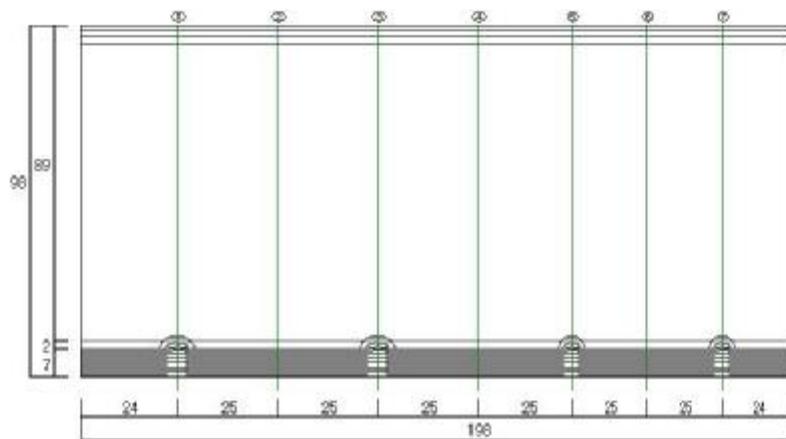
図 7.12 吸水開始 120 時間 (5 日) 後の計算結果 (強度の違い・物性値のばらつきを考慮した場合)



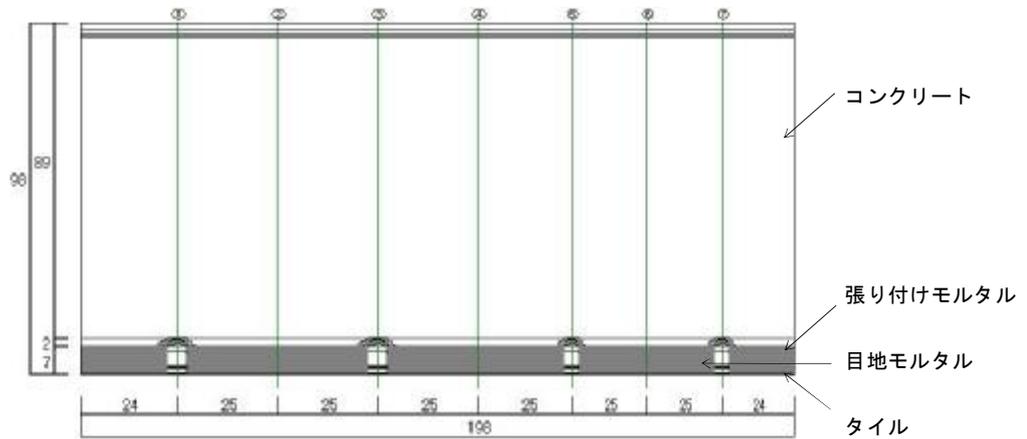
① Cal-1 (水分伝導率：大、平衡含水率曲線：急勾配)



② Cal-2 (水分伝導率：大、平衡含水率曲線：緩勾配)



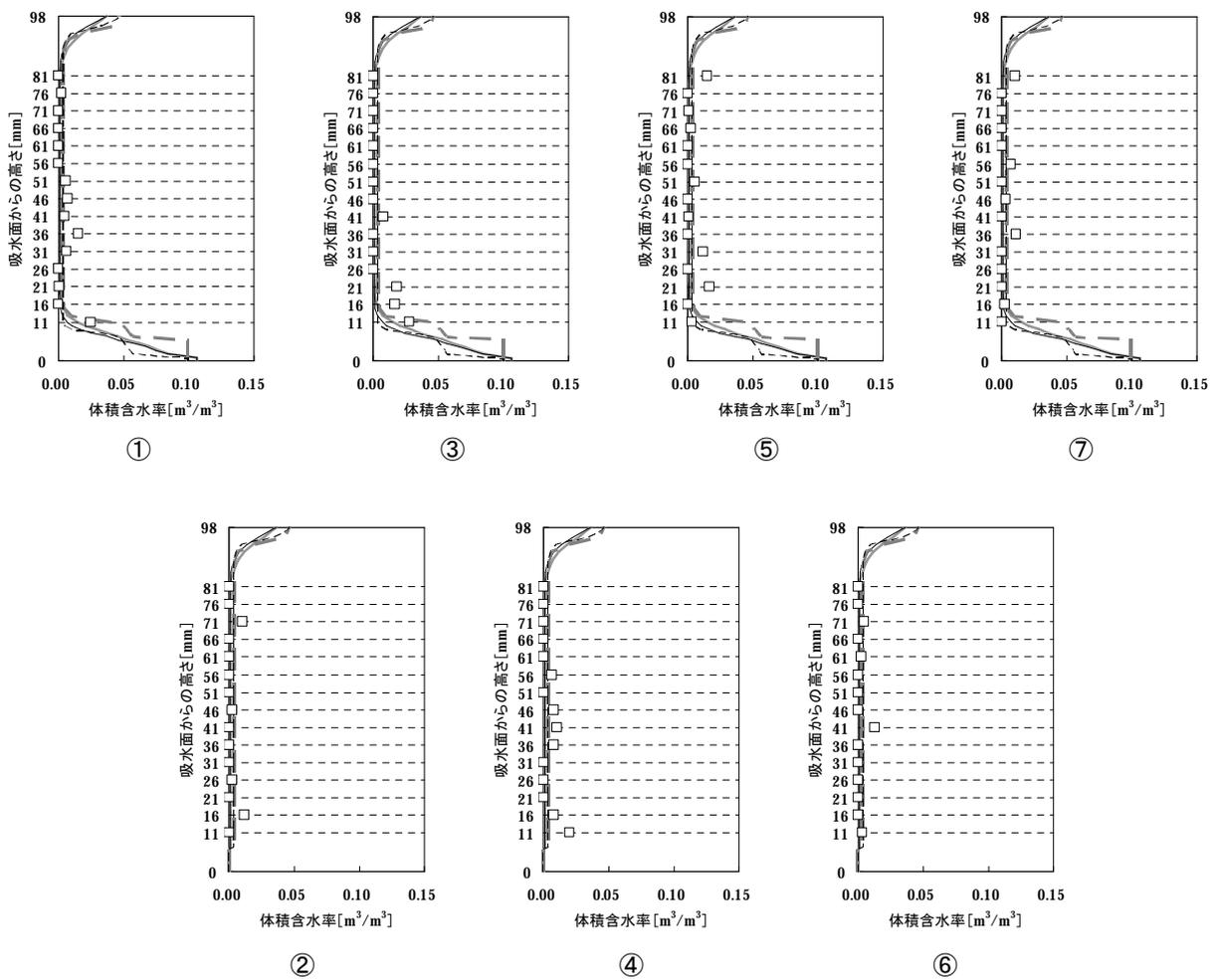
③ Cal-3 (水分伝導率：小、平衡含水率曲線：急勾配)



④ Cal-4 (水分伝導率：小、平衡含水率曲線：緩勾配)

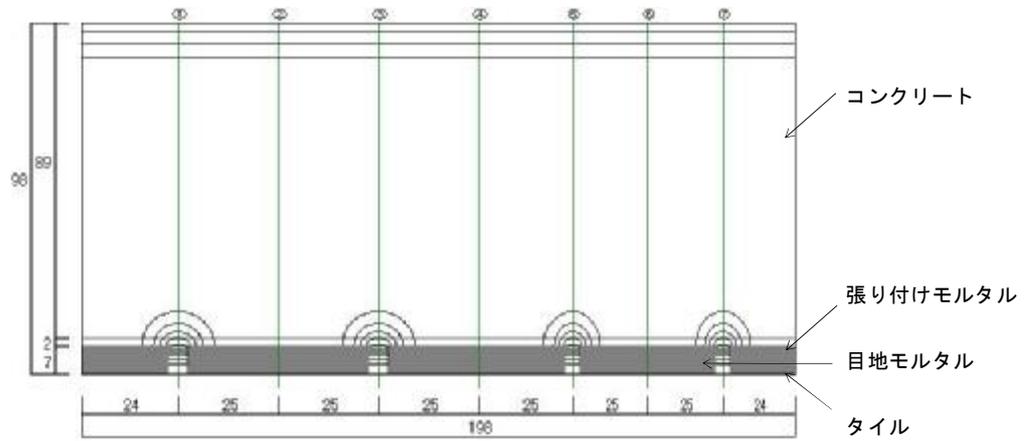
(a) 平面分布

太実線：Cal-1の計算結果、太点線：Cal-2の計算結果、細実線：Cal-3の計算結果、細点線：Cal-4の計算結果
 シンボル：試験体 No2 の測定結果

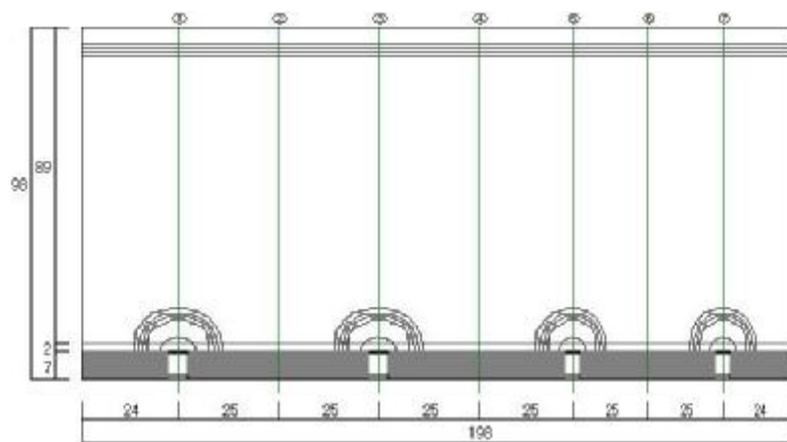


(b) ①~⑦の位置における含水率分布と測定結果 (試験体 No2) との比較

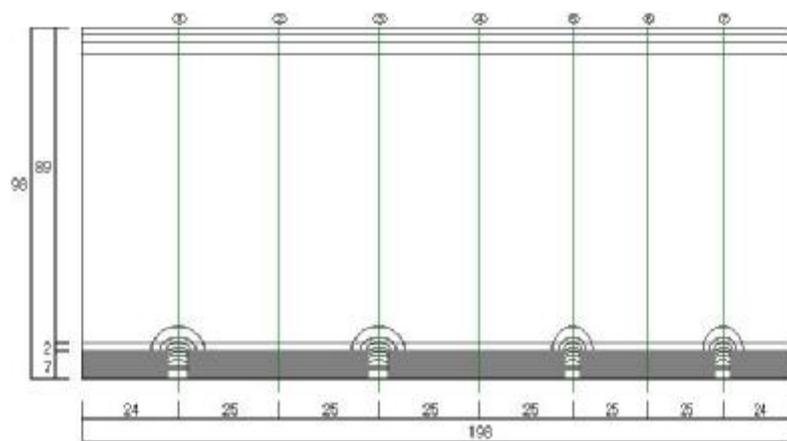
図 7.13 吸水開始 240 時間 (10 日) 後の計算結果 (強度の違い・物性値のばらつきを考慮した場合)



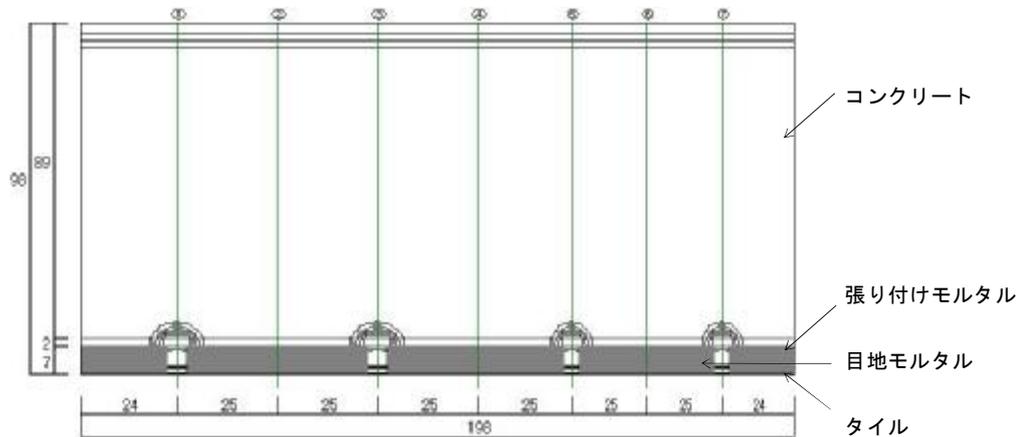
① Cal-1 (水分伝導率：大、平衡含水率曲線：急勾配)



② Cal-2 (水分伝導率：大、平衡含水率曲線：緩勾配)



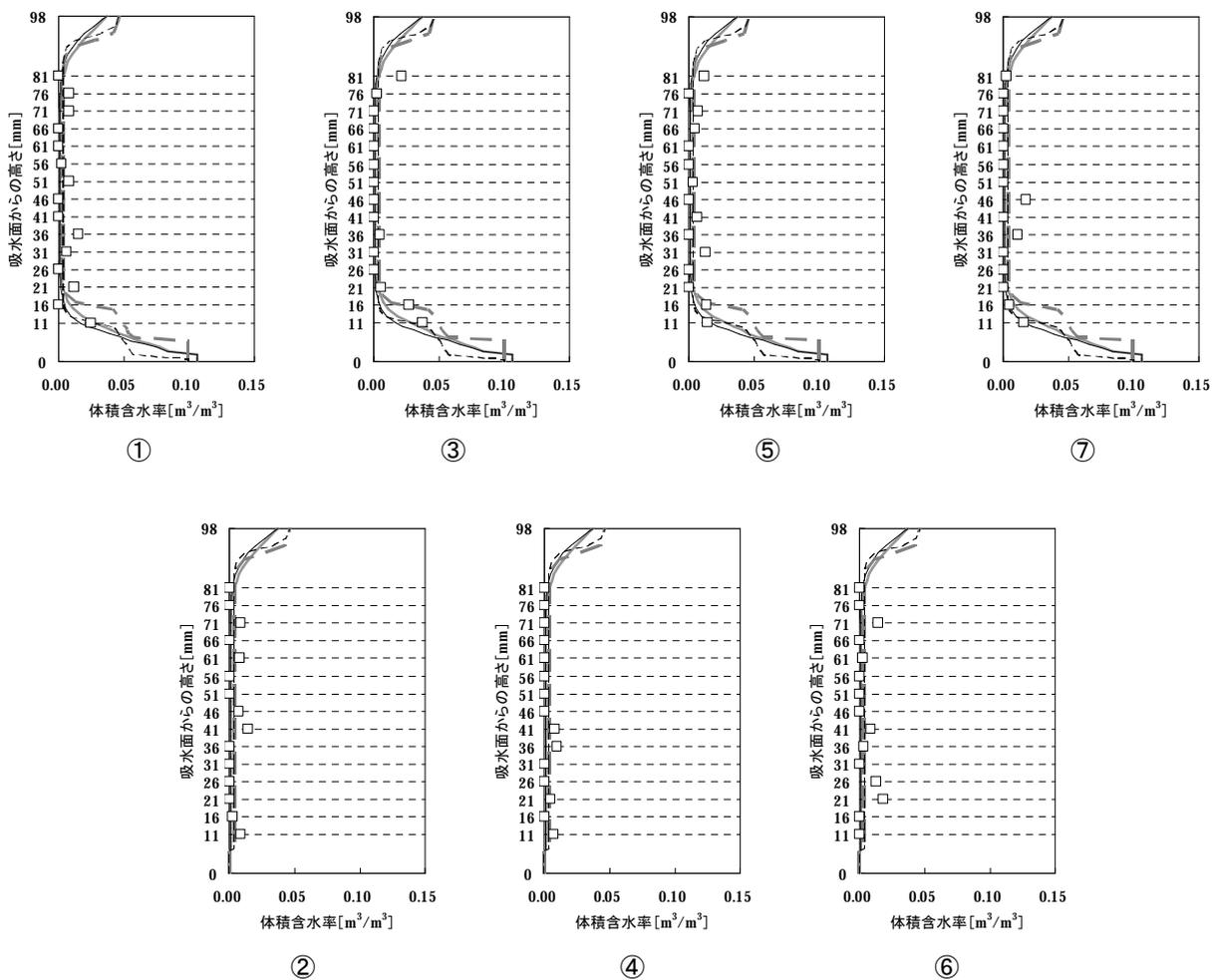
③ Cal-3 (水分伝導率：小、平衡含水率曲線：急勾配)



④ Cal-4 (水分伝導率：小、平衡含水率曲線：緩勾配)

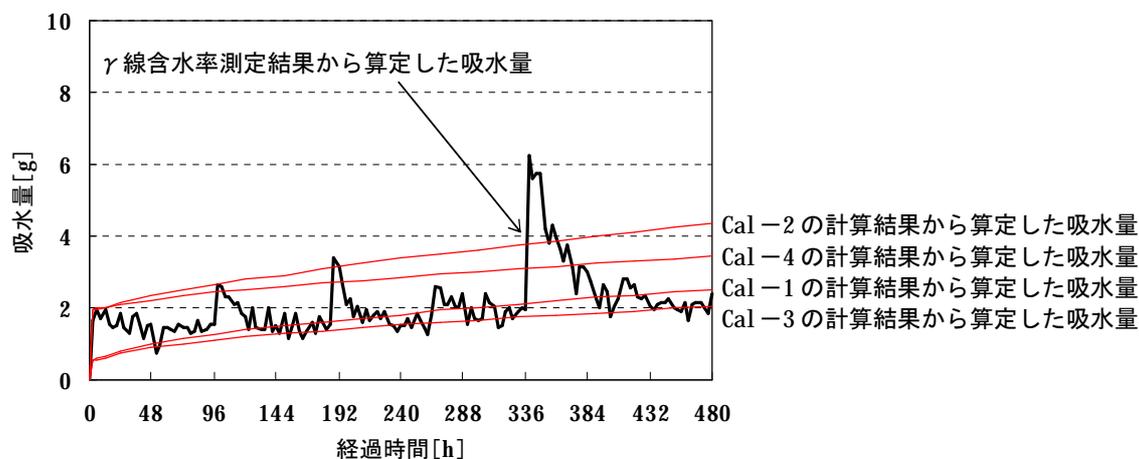
(a) 平面分布

太実線：Cal-1の計算結果、太点線：Cal-2の計算結果、細実線：Cal-3の計算結果、細点線：Cal-4の計算結果
 シンボル：試験体 No2 の測定結果



(b) ①～⑦の位置における含水率分布と測定結果 (試験体 No2) との比較

図 7.14 吸水開始 480 時間 (20 日) 後の計算結果 (強度の違い・物性値のばらつきを考慮した場合)



Cal-1: 水分伝導率が最大で、平衡含水率曲線が急勾配 Cal-2: 水分伝導率が最大で、平衡含水率曲線が緩勾配
 Cal-3: 水分伝導率が最小で、平衡含水率曲線が急勾配 Cal-4: 水分伝導率が最小で、平衡含水率曲線が緩勾配

図 7.15 吸水量の比較

7-4 本章のまとめ

本章では、強度の違いや物性値の測定結果におけるばらつきを考慮した解析を行った。その結果、第4章の吸水実験における試験体 No2 の含水率変動の測定結果と計算結果と間に良好な一致が見られた。このことから、タイル張り仕上げが施されたコンクリート壁体の水分移動性状の予測は、第3章の測定結果を用いた解析によって行え、強度の違いや物性値のばらつきを考慮することで、さらに精度の高い予測が可能と考えられる。

また、本章での計算により、強度の違いや物性値のばらつきがコンクリート壁体への水分浸透に与える影響について、以下に示す知見が得られた。

- ・水分伝導率の大きさは水分の移動速度に直接的に影響する。
- ・平衡含水率曲線の傾きおよび形状は含水率分布の形状に大きく影響する。

このことは、物性値のばらつきをどの程度、かつ、どのように考慮するかを判断するうえで貴重な情報となる。

【本章に関連する発表論文】

[2.8] 恩村、銚井、松下、小椋、小南、安井：「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6 解析に用いた値が結果に及ぼす影響」、日本建築学会大会学術講演梗概集(九州)、pp.361～362、2007.8

[3.7] 恩村、銚井、松下、小椋、小南、安井：「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6 解析に用いた値が結果に及ぼす影響」、平成19年度日本建築学会近畿支部研究報告集、pp.161～164、2007.6

第 8 章 振動および加熱が水分浸透に及ぼす影響

8-1 はじめに

第 6 章および第 7 章では、吸水実験に関する解析を行い、計算結果と測定結果を比較した。強度の違いや物性値のばらつきを考慮することで、3 体の試験体のうちの 1 体についてはほぼ実験が再現された。しかし、残りの 2 体については良い一致が得られず、特定の位置での水分伝導率もつと大きな値であった可能性が高いことが考えられる。

実験中は、各試験体にひび割れが生じたり、タイルが剥がれたりしていないか等の確認を目視で行っている。しかしながら、コンクリート内部の毛細管空隙の径が大きくなったり、毛細管空隙そのものの数が増えたりするような変化は目視では確認できない。空隙構造の変化は水分伝導率の値に大きく影響する。

その要因として、やはり切断時の振動と乾燥時の加熱（105℃で 4 日間乾燥）が考えられたので、本章ではそれらの影響について検討する。

γ線含水率測定に用いたタイルを張り付けたコンクリート体（300mm×200mm×100mm）は余分に作成していたので、まず、それらを用いた簡易な実験によって影響の有無を確認し、解析によって影響の大きさを検討する。

8-2 切断時の振動の影響

第 4 章の吸水実験に用いた試験体は、コンクリート体を切断して作成した。1 回の切断長さは 20cm で、速度は 5mm/分である。4 回目の切断で試験体 No3 が、5 回目の切断で試験体 No2 が、6 回目の切断で試験体 No1 が取り出された。この切断時の振動が水分移動に関する物性値に及ぼす影響を知るために、以下に示す実験を行った。

余分に作成しておいたタイルを張り付けたコンクリート体のうちの 1 体を用いて、最初にタイル面から吸水させて重量変化を測定し（「吸水 1」と称す）、その後、**図 8.1**に示すように γ線含水率測定のとくと同じ位置、同じ順序でコンクリート体を切断して 8 個の試験体に分割した。試験体④

が試験体 No1 に、試験体③が試験体 No2 に、試験体②が試験体 No3 に対応する。試験体側面を断湿した後、タイル面から吸水させて重量変化を測定した（「吸水 2」と称す）。

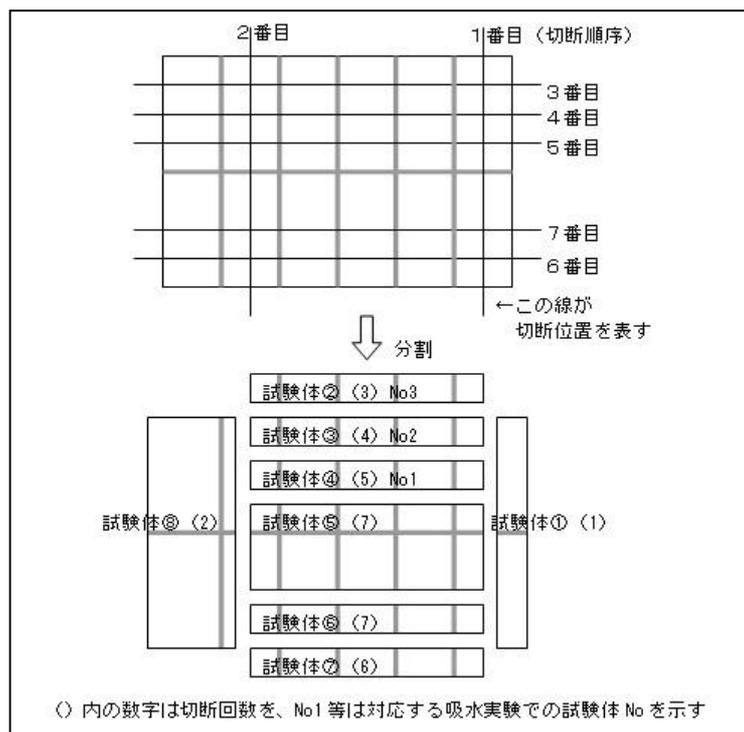


図 8.1 コンクリート体の切断位置と順序および切断回数

コンクリート体の重量変化を図 8.2 に示す。「吸水 1」での吸水量は、 γ 線含水率測定における試験体 No2 の吸水量よりもやや多い程度であった。

切断時に水を使っているので「吸水 1」と「吸水 2」とでは初期の含水量が異なり、切断前後の吸水量を直接比較することができない。そこで、切断前のコンクリート体と切断後の各試験体の単位目地面積 (1cm^2) 当たりの吸水量を比較した。その結果を図 8.3 に示す。もし、切断後のある試験体の単位目地面積当たりの吸水量が切断前のコンクリート体のそれよりも大きく増加した場合、切断による影響があった可能性が考えられるが、切断後の試験体の吸水量は切断前のコンクリート体の吸水量よりも大部分において小さい。また、切断回数と吸水量との間には特別な傾向（切断回数が多い、すなわち多くの振動を受けるほど吸水量が多いなど）は見られない。

以上から、今回の吸水実験では、切断時の振動の影響は非常に小さかったと考えられる。

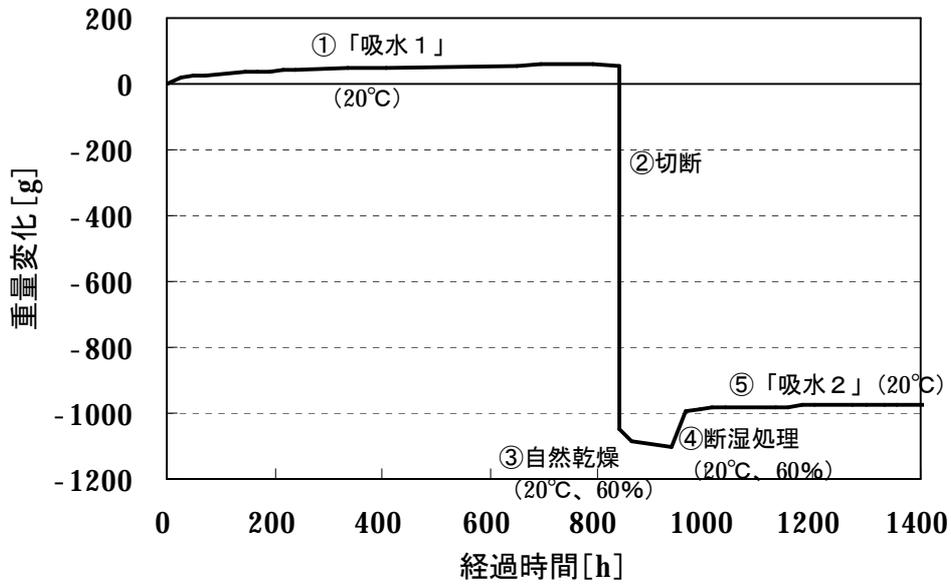


図 8.2 コンクリート体の重量変化
 ※「吸水1」開始時の重量を0として表示、切断後は各試験体重量の総量を表す。

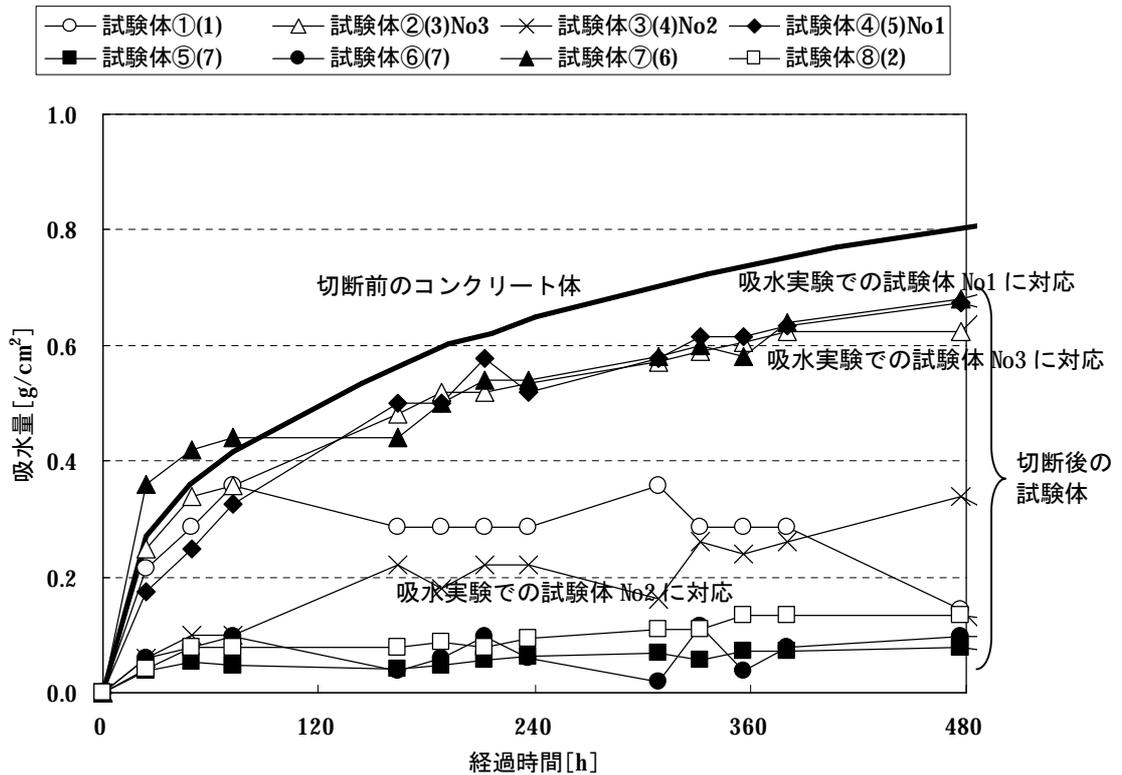


図 8.3 切断前のコンクリート体と切断後の各試験体の単位目地面積当たりの吸水量の比較
 ※白抜きシンボル：切断回数が少ない、黒塗りのシンボル：切断回数が多い。
 ※凡例の () 内の数字は切断回数を、No1 等は吸水実験での試験体との対応を示す。

8-3 乾燥時の加熱の影響

第4章の吸水実験に用いた試験体は、吸水の前に105°Cで4日間乾燥させた。この乾燥時の加熱が水分移動に関する物性値に及ぼす影響を知るために、以下に示す実験を行った。

余分に作成しておいたタイルを張り付けたコンクリート体のうちの1体（前節の実験に用いたコンクリート体とは別のもの）を用いて、最初にタイル面から吸水させて重量変化を測定し（「吸水3」と称す）、その後、105°Cで4日間乾燥し、さらにタイル面から吸水させて重量変化を測定した（「吸水4」と称す）。

コンクリート体の重量変化を図8.4に示す。「吸水3」での吸水量は γ 線含水率測定における試験体No2の吸水量よりもやや少ない程度であった。

図8.5は「吸水4」における吸水量の測定結果を γ 線含水率測定の結果と比較したものである。もし、加熱の影響がなければ「吸水4」での吸水量は、加熱の影響がなかったと思われる γ 線含水率測定における試験体No2の吸水量に近いはずである。しかしながら、測定結果は γ 線含水率測定における試験体No2の吸水量よりもかなり多い。したがって、 γ 線含水率測定における試験体No1およびNo3は加熱の影響を受けた可能性が高いと考えられる。

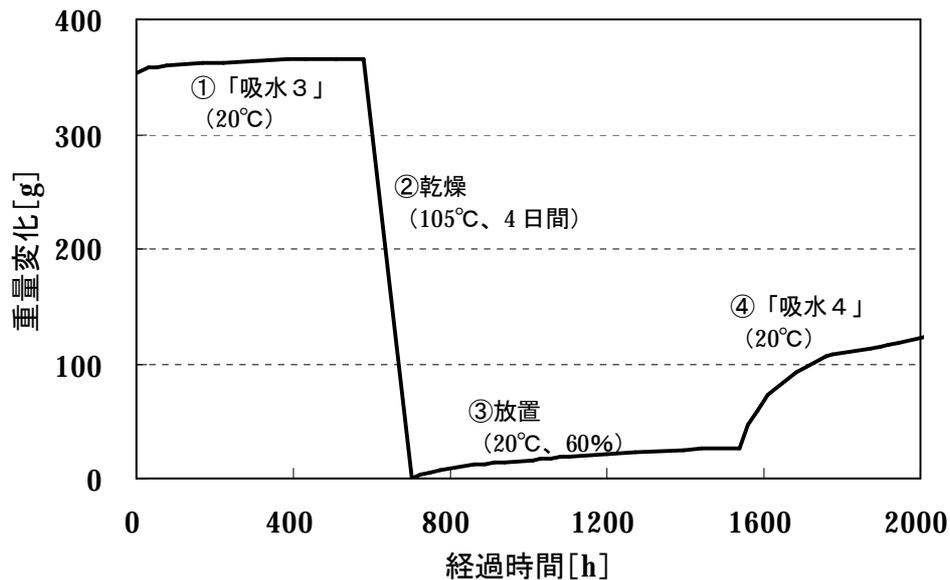


図8.4 コンクリート体の重量変化
※乾燥時の重量を0として表示している。

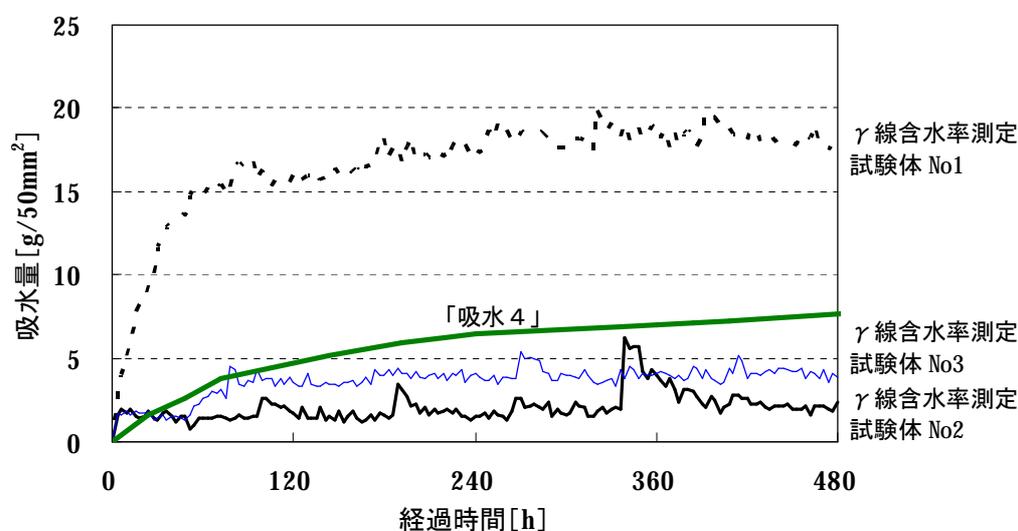


図 8.5 測定結果の比較
 γ 線含水率測定 of 各試験体と「吸水4」における単位目地面積当たりの吸水量

8-4 タイルの浮きについて

タイルを張ったコンクリート試験体のタイル表面に赤外線ランプを一定時間照射した後、一定時間照射を止めるというサイクルを繰り返すことによって、張り付けモルタルとコンクリートとの界面での剥離が多くなることが知られている。これは、タイルに拘束された張り付けモルタルの伸びとコンクリートの伸びが異なり、そこにせん断力が加わるためである [70]、[71]、[72]。

今回の実験においても、105°C・4日間の乾燥によってタイルに浮きが生じた可能性が十分に考えられる。このことを検証するために以下の実験を行った。

まず、余分に作成しておいたタイルを張ったコンクリート体の残り（10体）について、タイルの浮きを打診法によって調査した。その結果、120枚のタイルの中で4枚のタイルに浮きが確認された（3.3%）。コンクリート体は外界の影響を受けにくい室内で約1年間放置していたので、この結果は施工のばらつきと言える。

次に、浮きがまったく確認されなかったコンクリート体を1体選び、105°Cで乾燥させ、一定時間毎にタイルの浮きの発生を調査した。その結果を図8.6示す。乾燥時間の経過とともに端部のタイルから順次浮きが生じる傾向が見られる。浮きは乾燥1日後から確認され（四隅のタイル）、乾燥6日後には全タイルの浮きを確認された。ただし、乾燥4日後（吸水実験での設定）の結果に注

目すると、2枚のタイルについては浮きを確認されていない。

なお、乾燥8日後にはタイルの接着強度は人力で剥がれるほどまで低下し、文献[70]、[71]、[72]に記されたとおり、剥離面は張り付けモルタルとコンクリートの界面であった(写真8.1を参照)。

以上から、第4章の吸水実験における試験体 No1 と No3 については、乾燥後すでにタイルに浮き生じていた可能性も考えられる。

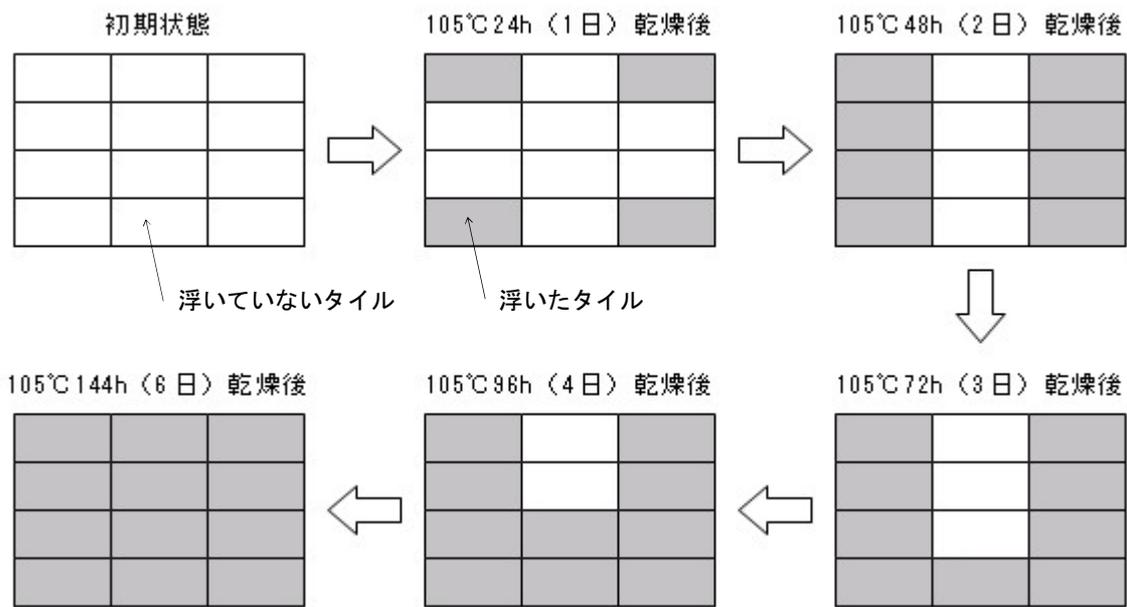


図 8.6 タイルの浮きに関する実験結果

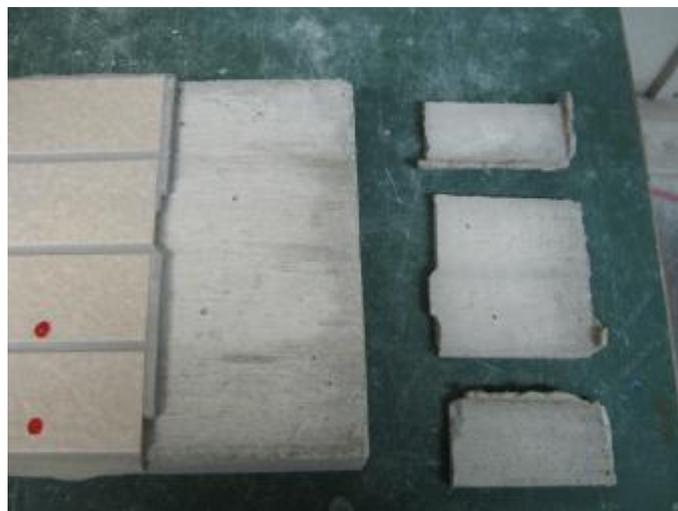


写真 8.1 タイルの剥離状況

8-5 解析による検討

加熱の影響によって水分伝導率が大きく変化したという前提で、部分的に水分伝導率の値をいろいろと変えてこれまでと同様の計算を行った。

試験体 No1 については、試行錯誤の結果、図 8.7 に示す値を水分伝導率に用いたとき、図 8.8～図 8.12 に示すように試験体の右半分（目地⑤、タイル中央⑥、目地⑦）において計算結果と測定結果との間に比較的良好な一致が見られた。数値そのものは必ずしも等しくはないが、変化の傾向は良く類似している。

しかし、吸水の激しい目地①や目地①から吸水された水分の水平移動で含水率が上昇したと思われるタイル中央②、目地③およびタイル中央④においては、計算結果は測定結果よりもかなり小さい。また、図 8.13 に示すように吸水量の測定結果と計算結果の間にもかなり大きな差がある。

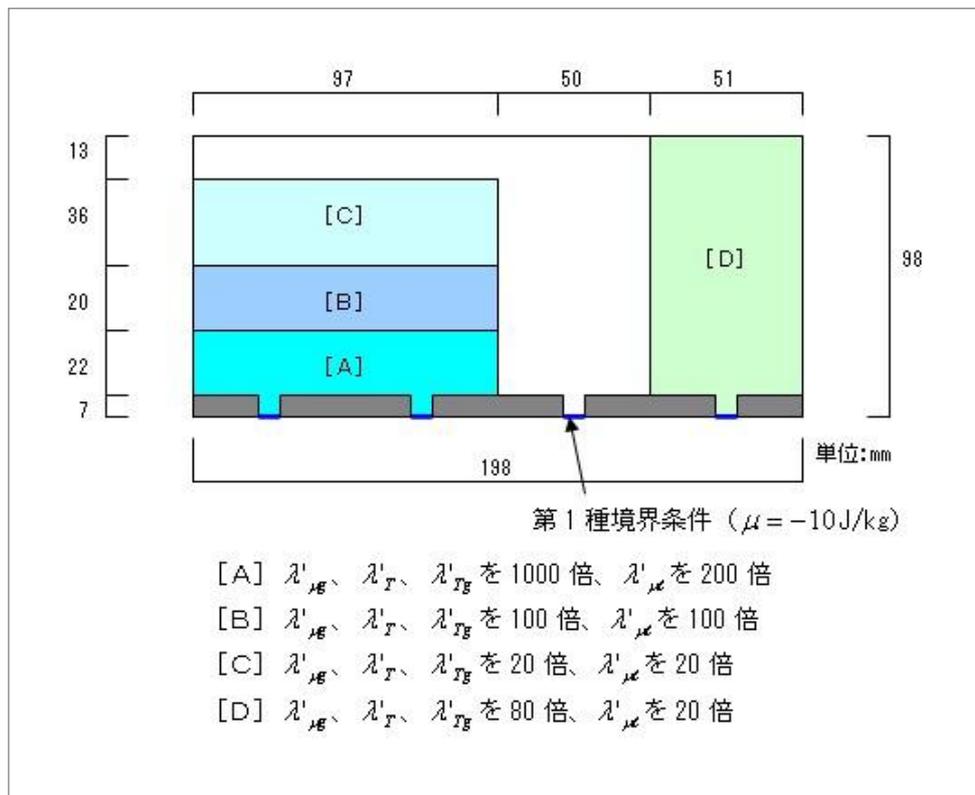
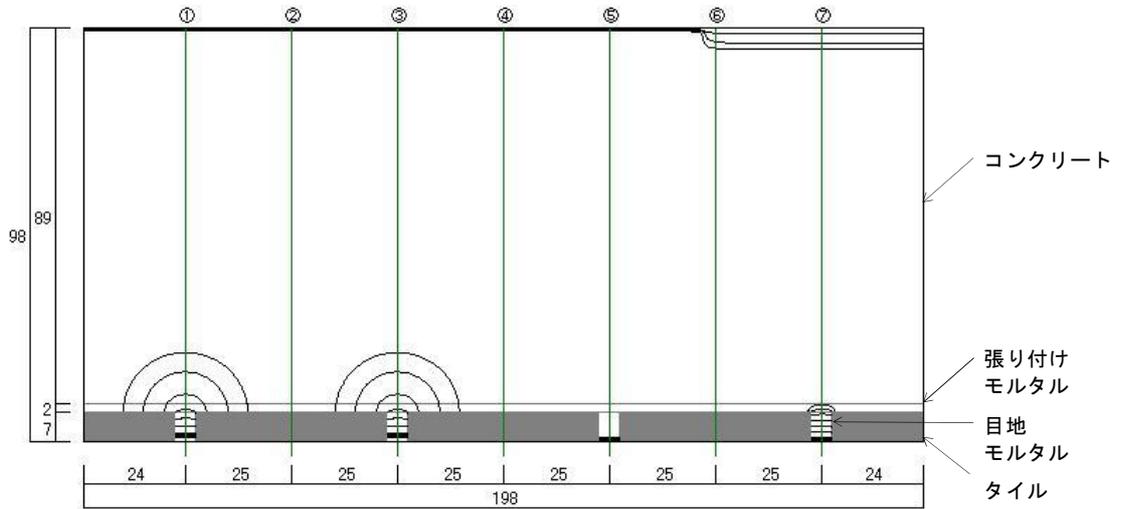
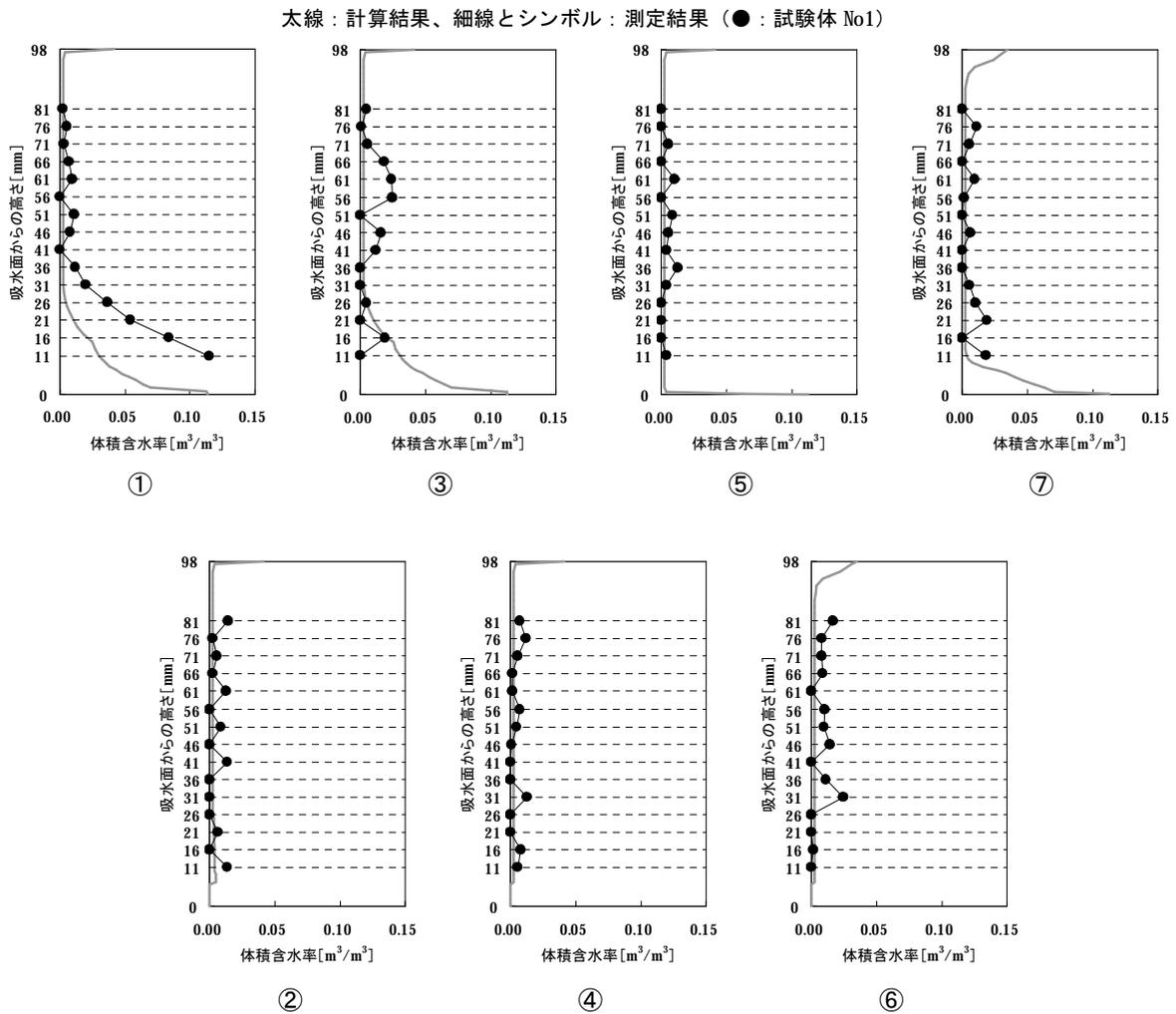


図 8.7 計算に用いた水分伝導率（試験体 No1）

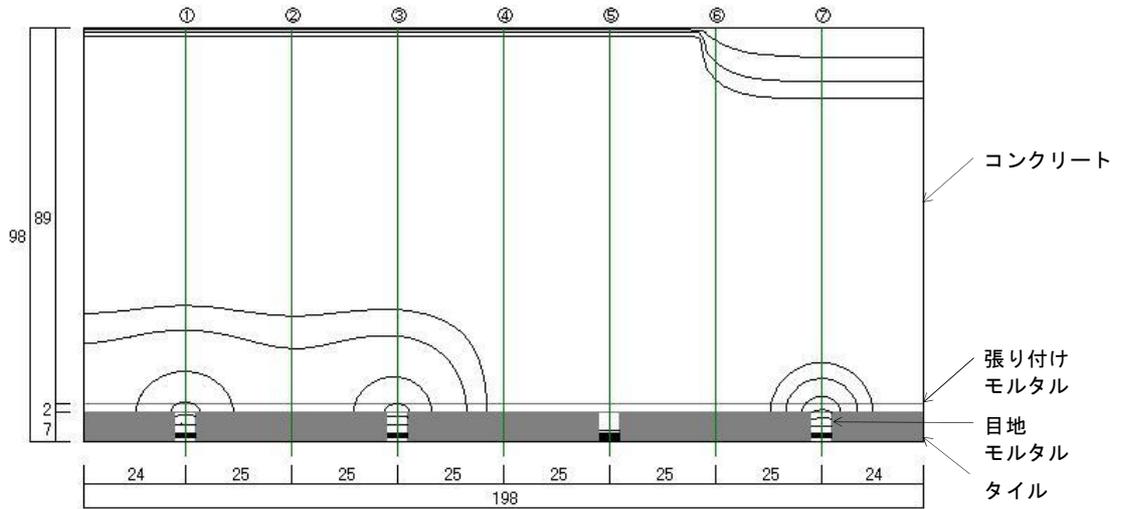


(a) 平面分布

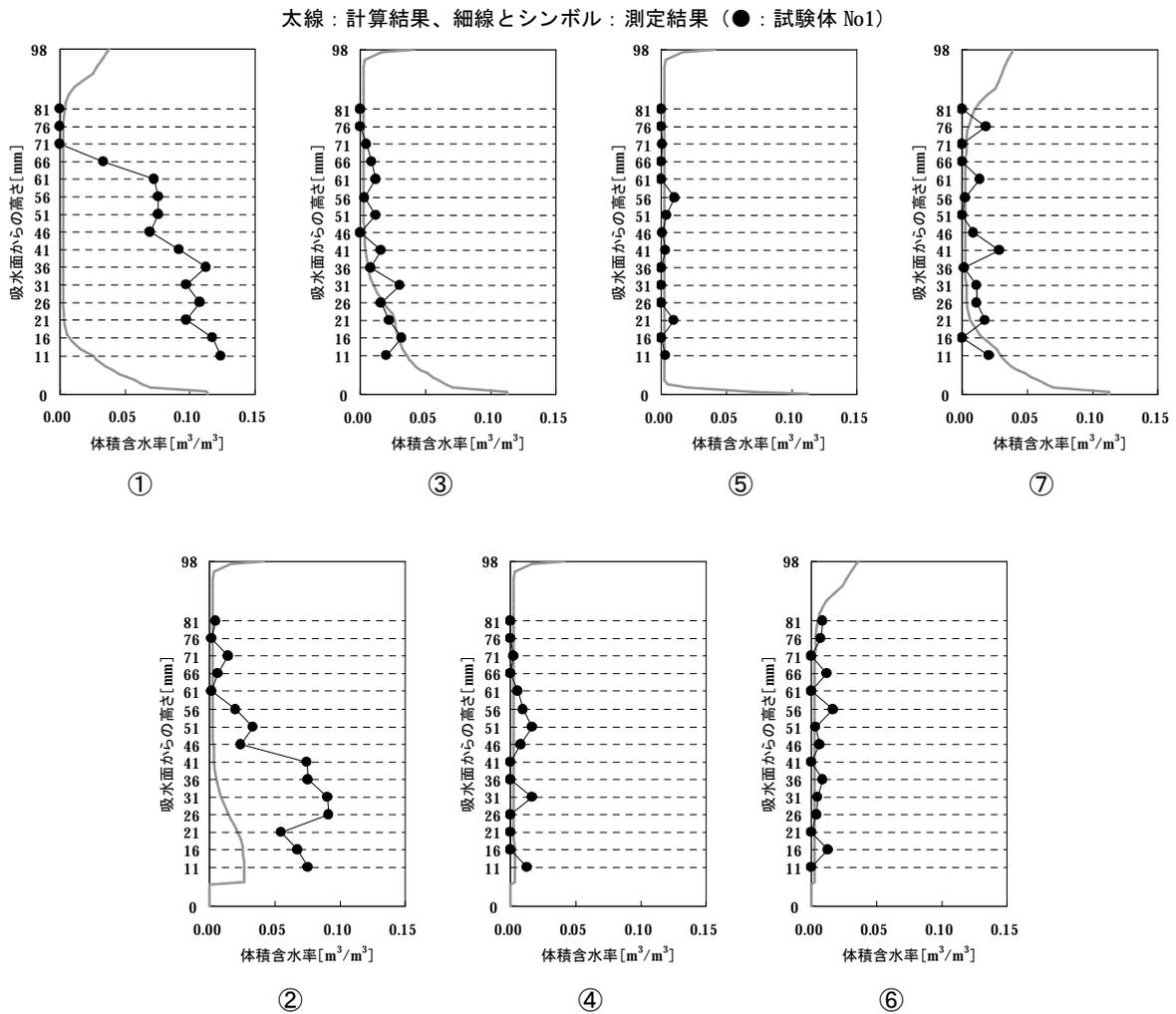


(b) ①～⑦の位置における含水率分布と測定結果 (試験体 No1) との比較

図 8.8 吸水開始 3 時間後の計算結果

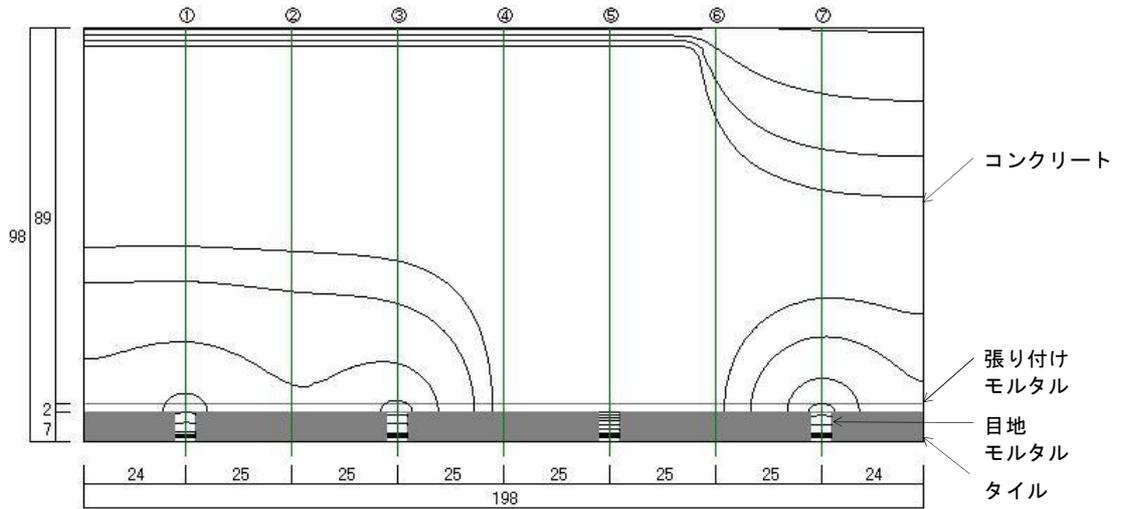


(a) 平面分布

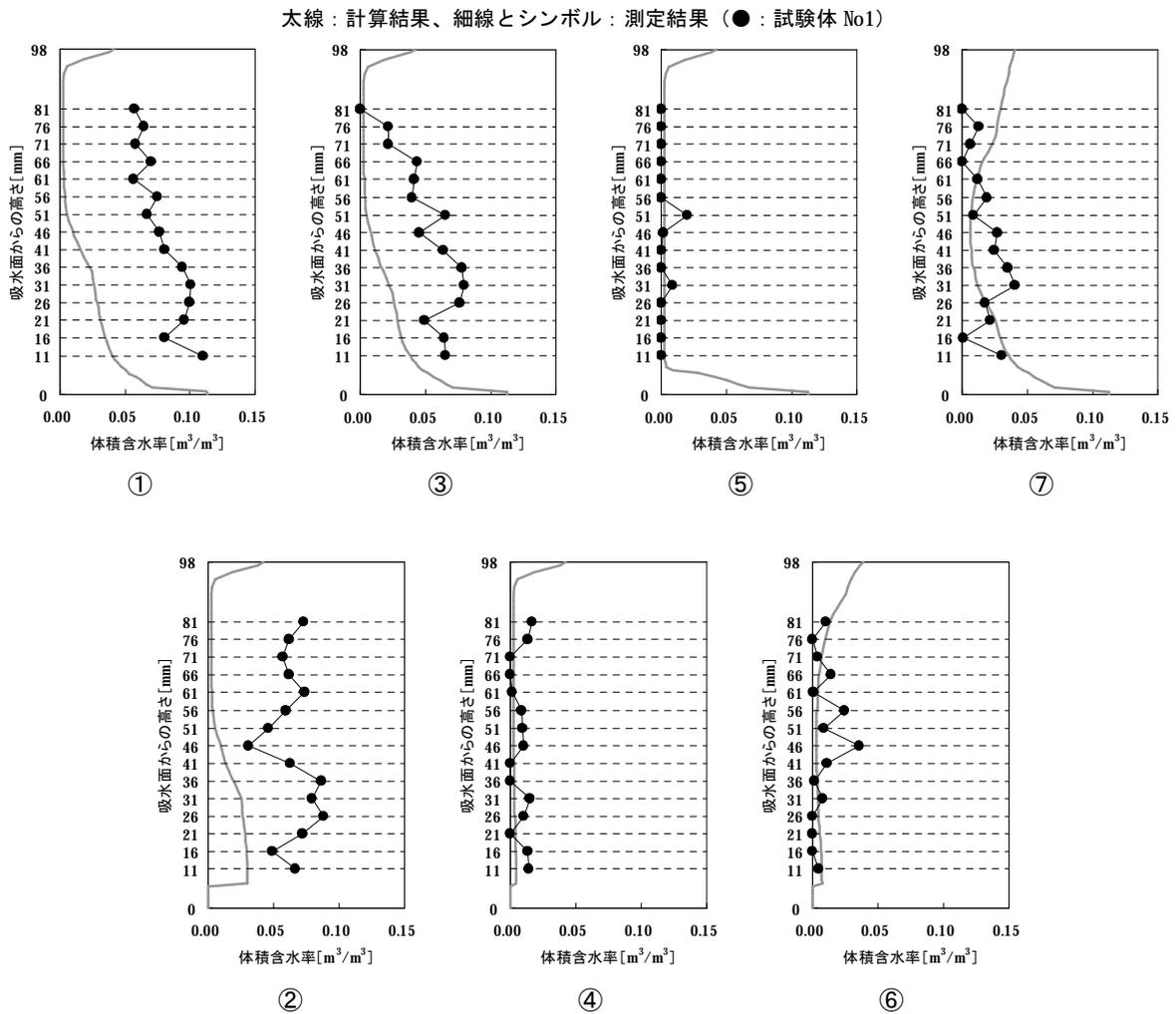


(b) ①～⑦の位置における含水率分布と測定結果 (試験体 No1) との比較

図 8.9 吸水開始 24 時間 (1 日) 後の計算結果

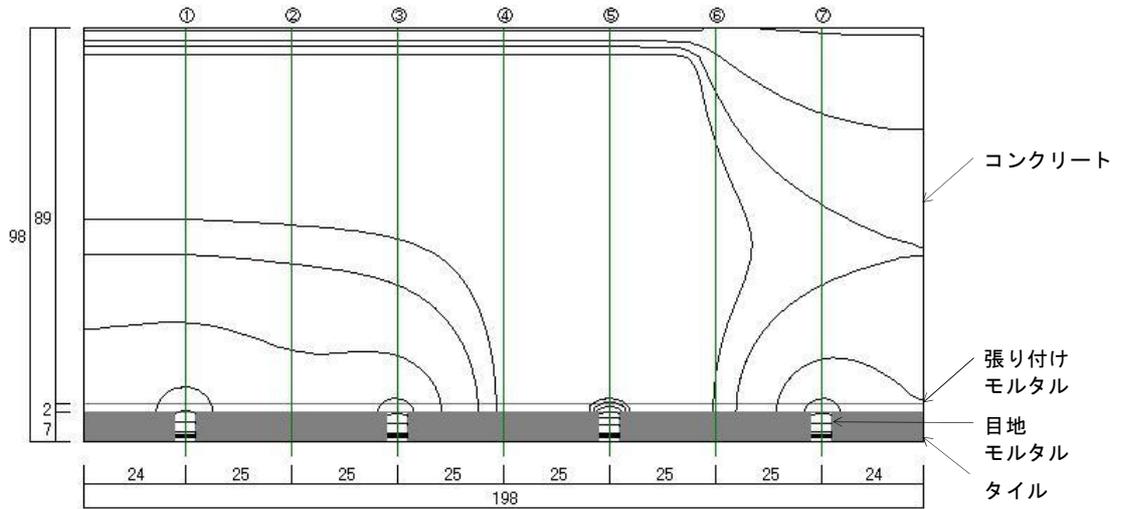


(a) 平面分布

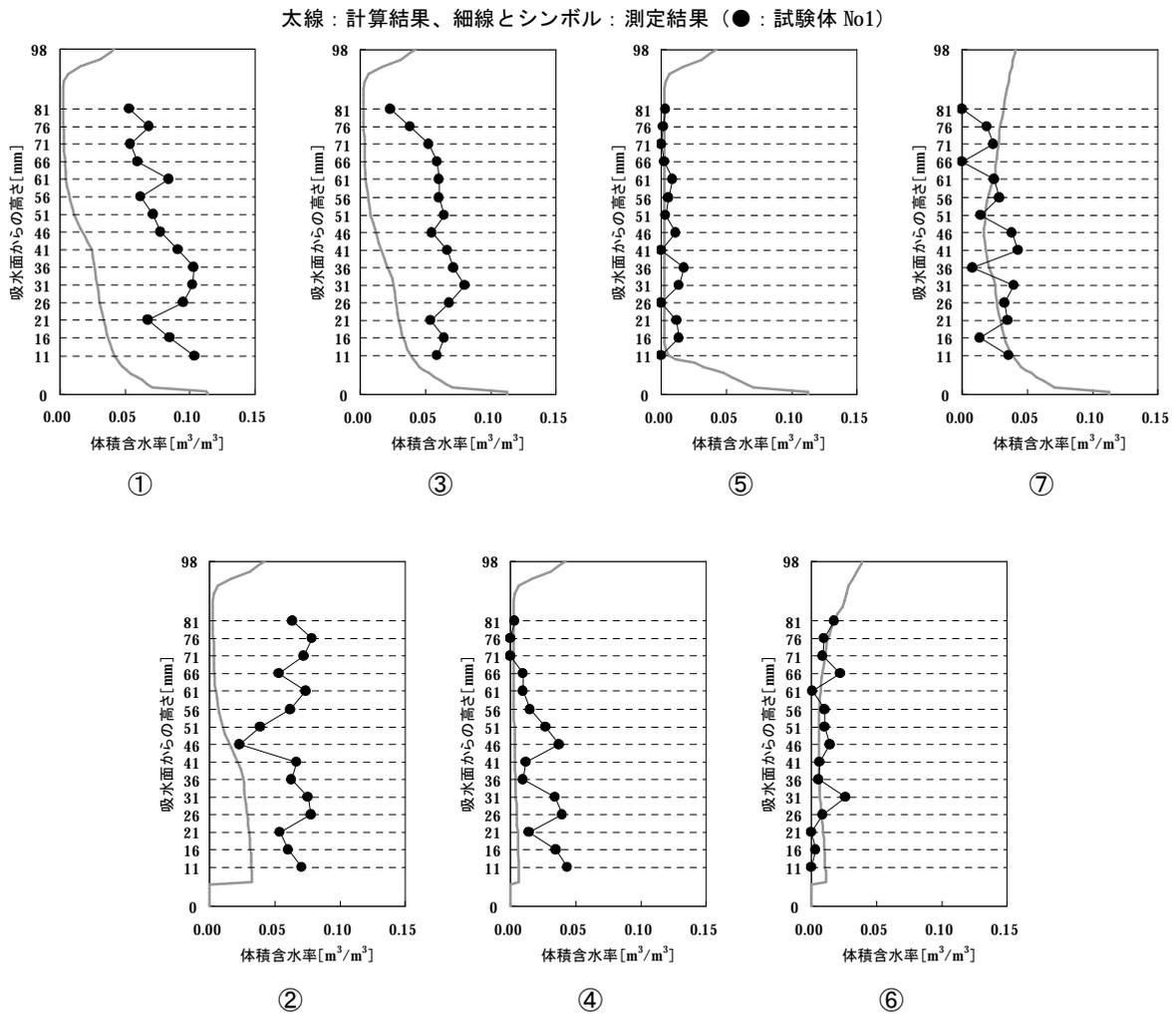


(b) ①～⑦の位置における含水率分布と測定結果 (試験体 No1) との比較

図 8.10 吸水開始 120 時間 (5 日) 後の計算結果

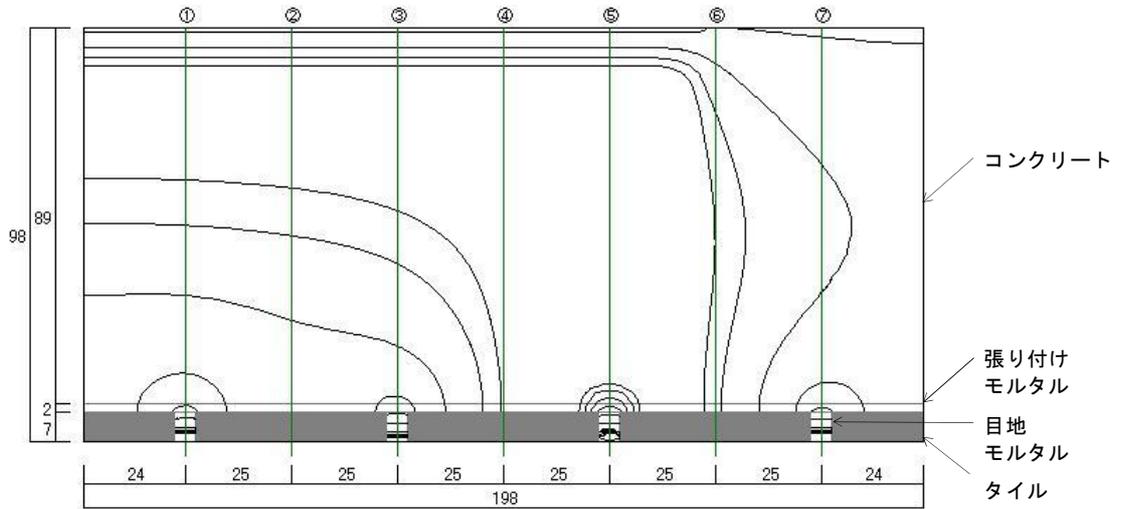


(a) 平面分布

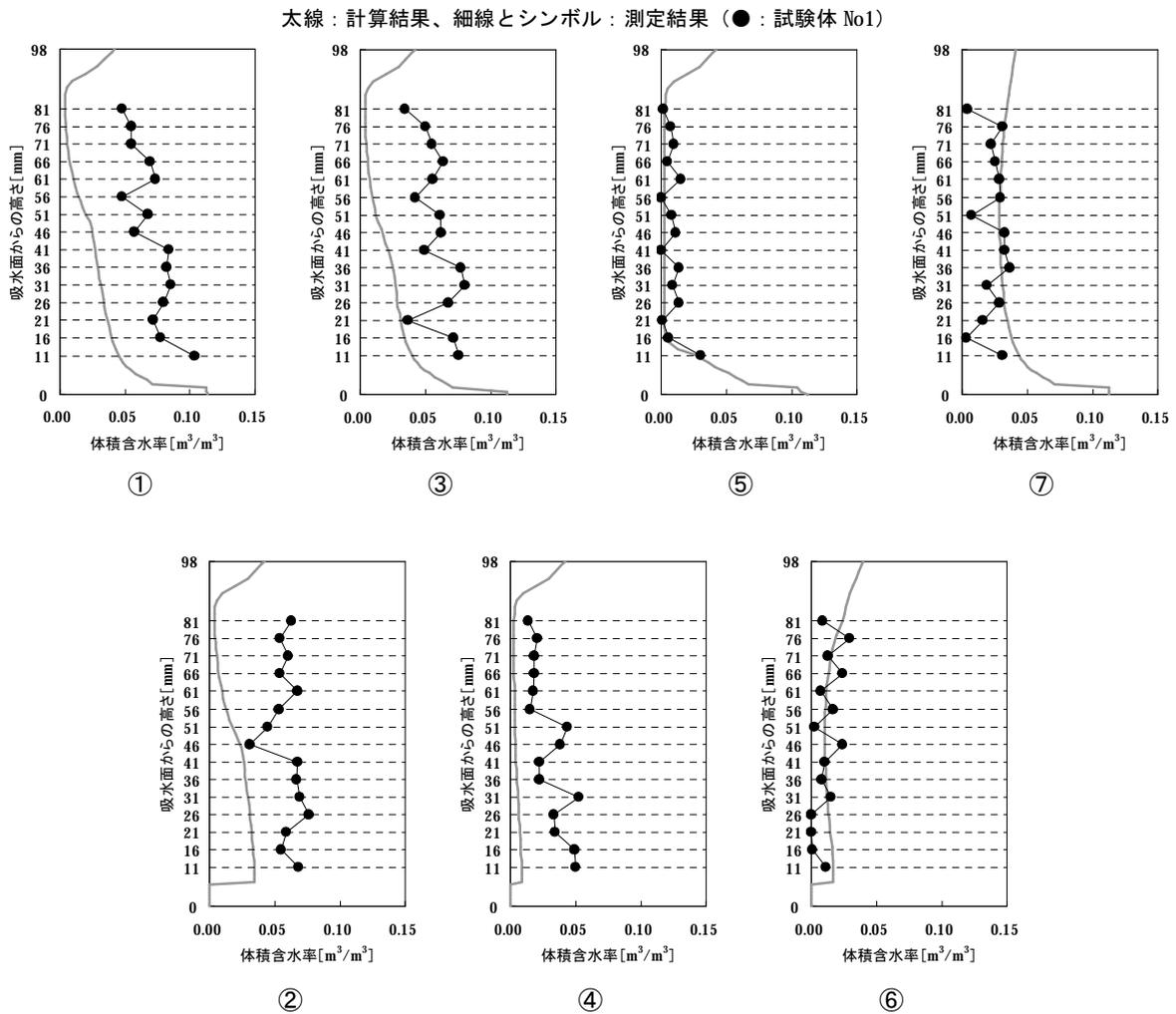


(b) ①～⑦の位置における含水率分布と測定結果 (試験体 No1) との比較

図 8.11 吸水開始 240 時間 (10 日) 後の計算結果



(a) 平面分布



(b) ①～⑦の位置における含水率分布と測定結果 (試験体 No1) との比較

図 8.12 吸水開始 480 時間 (20 日) 後の計算結果

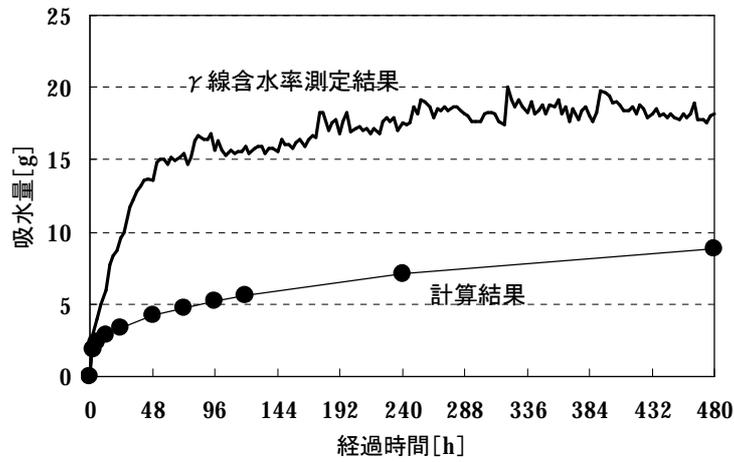


図 8.13 吸水量の比較 (試験体 No1)

試験体 No3 については、試行錯誤の結果、図 8.14 に示す値を水分伝導率に用いたとき、図 8.15 ~ 図 8.19 に示すように計算結果と測定結果との間に比較的良好な一致が見られた。

また、図 8.20 に示すように吸水量の測定結果と計算結果とは比較的良好く一致している。

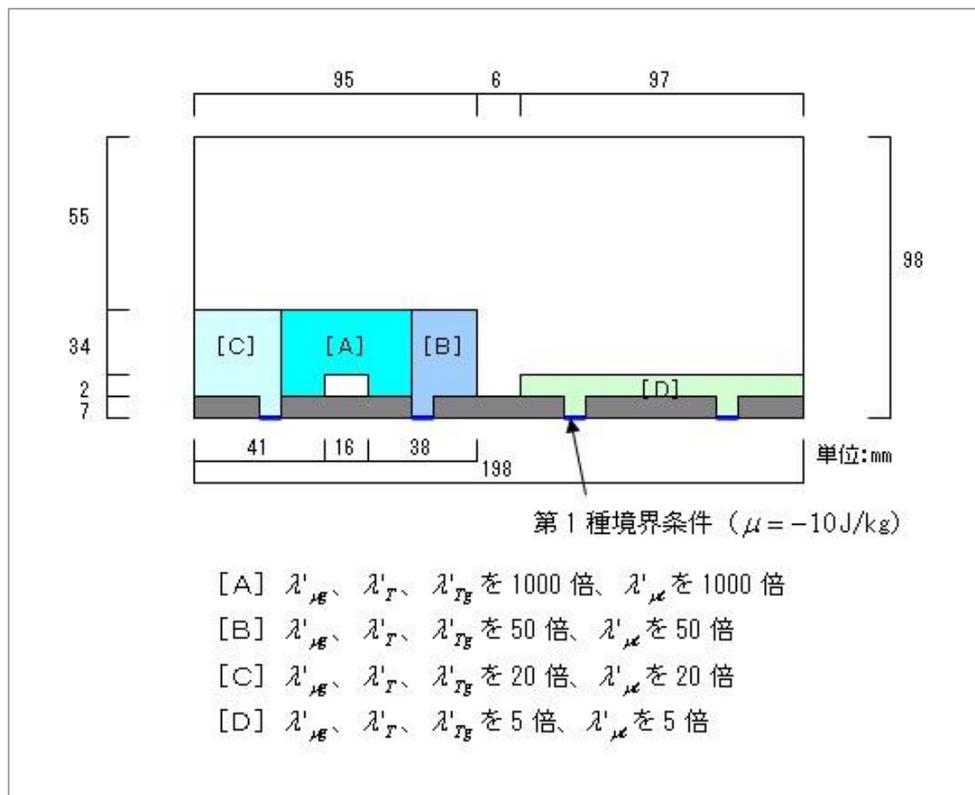
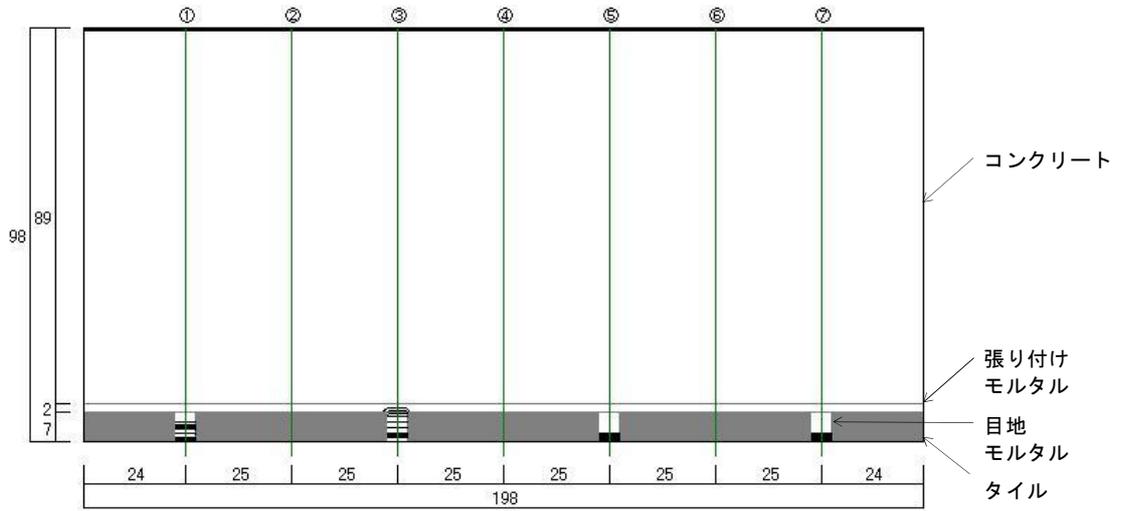
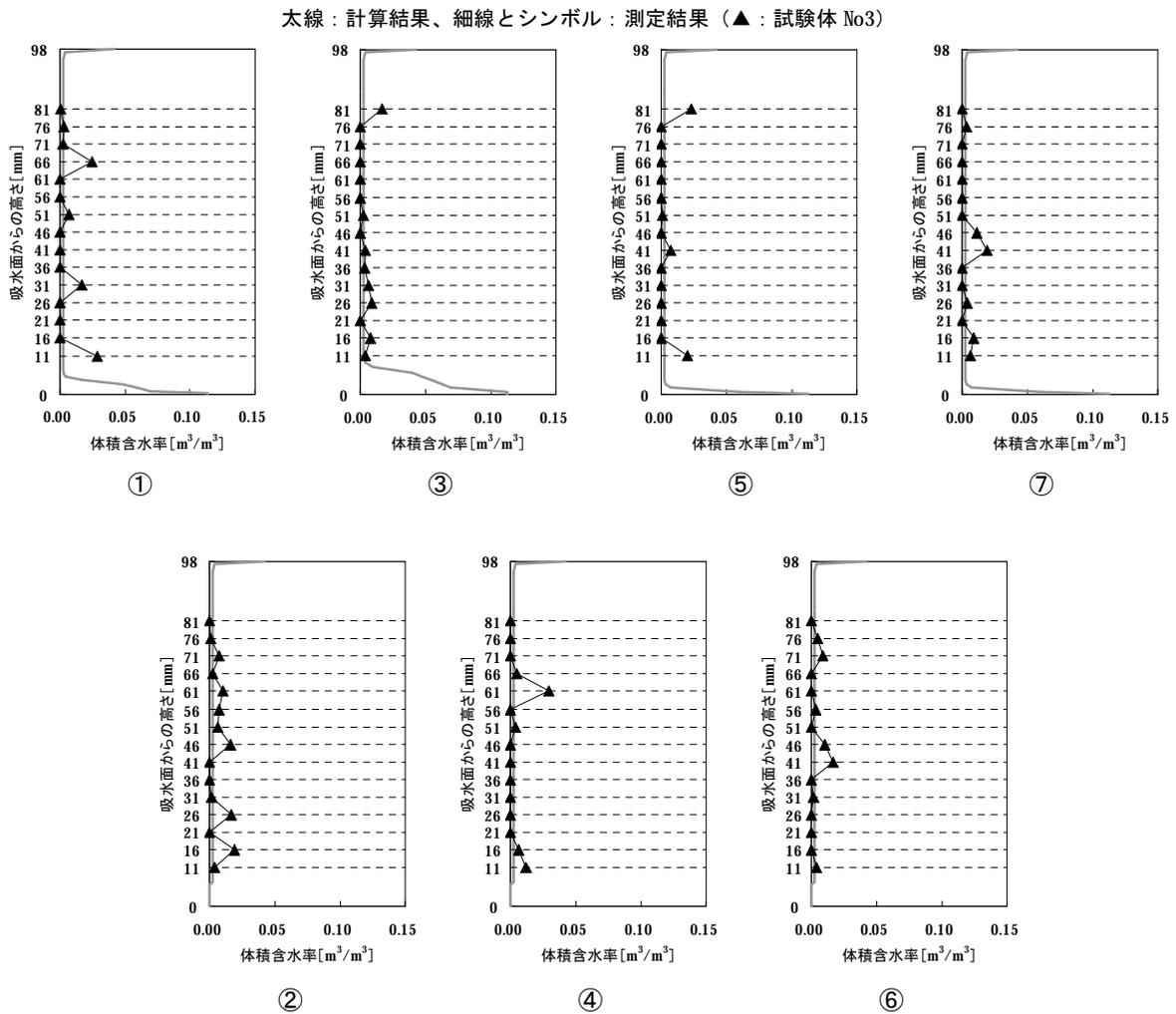


図 8.14 計算に用いた水分伝導率 (試験体 No3)

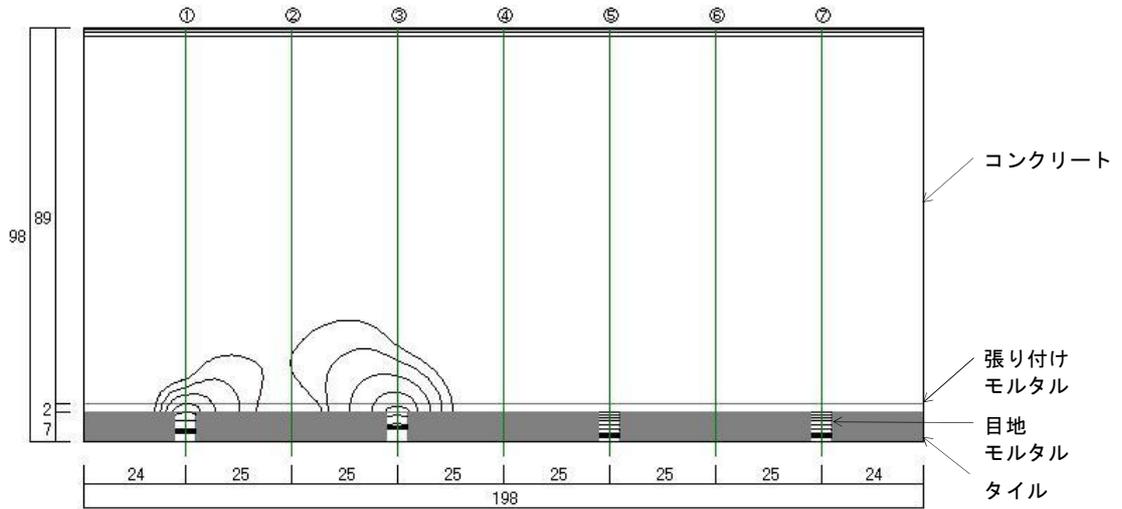


(a) 平面分布

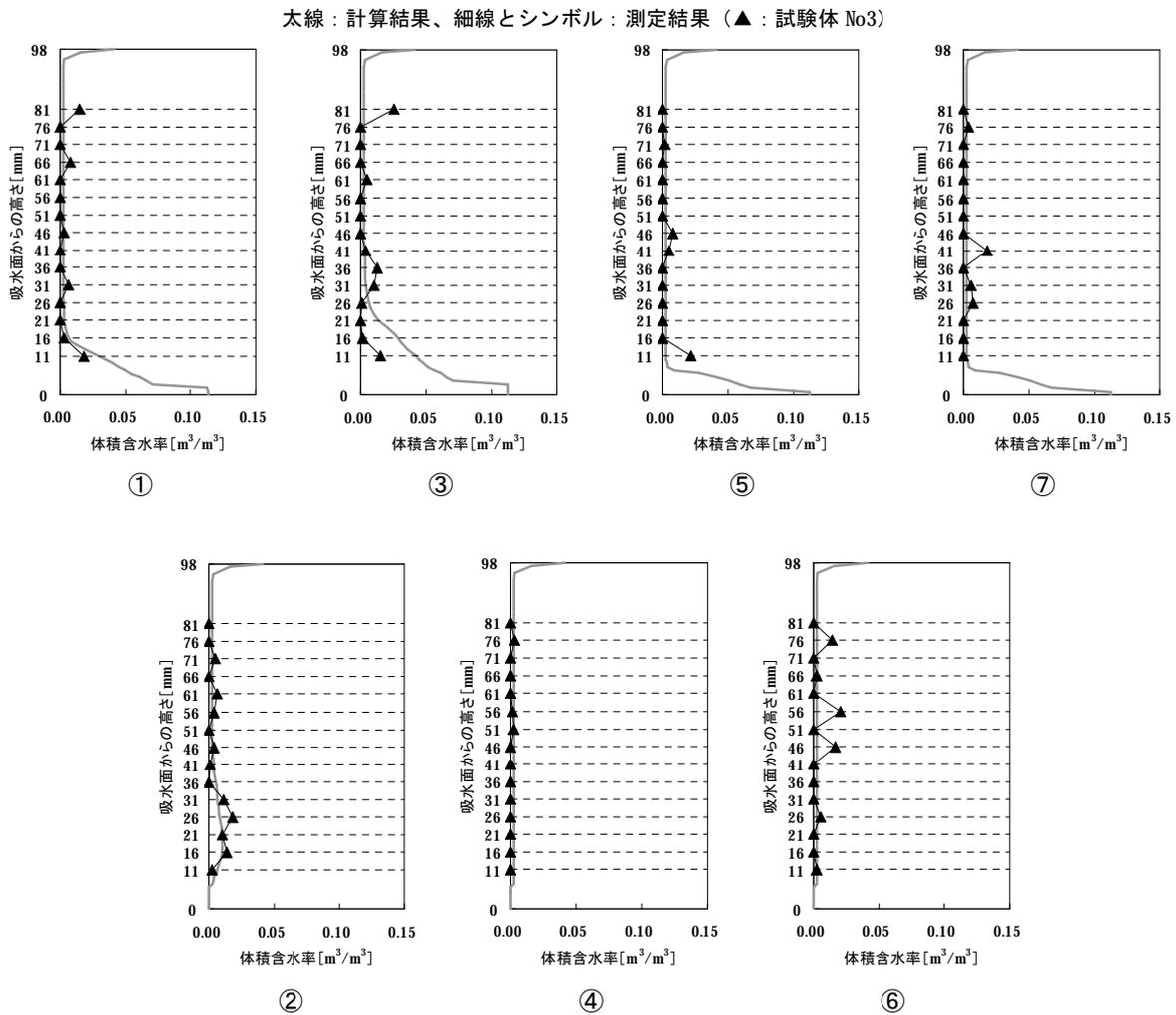


(b) ①～⑦の位置における含水率分布と測定結果 (試験体 No3) との比較

図 8.15 吸水開始 3 時間後の計算結果

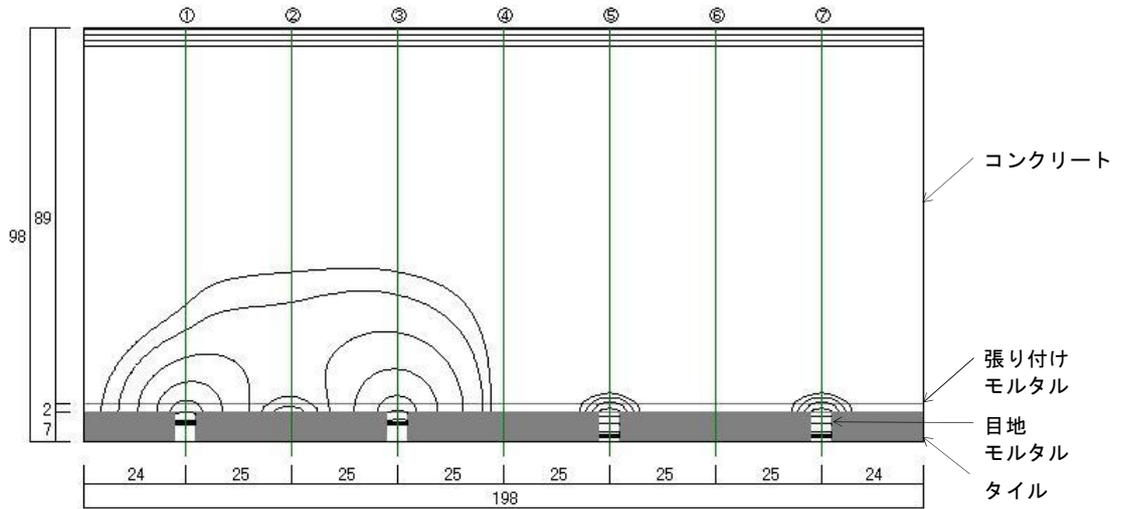


(a) 平面分布



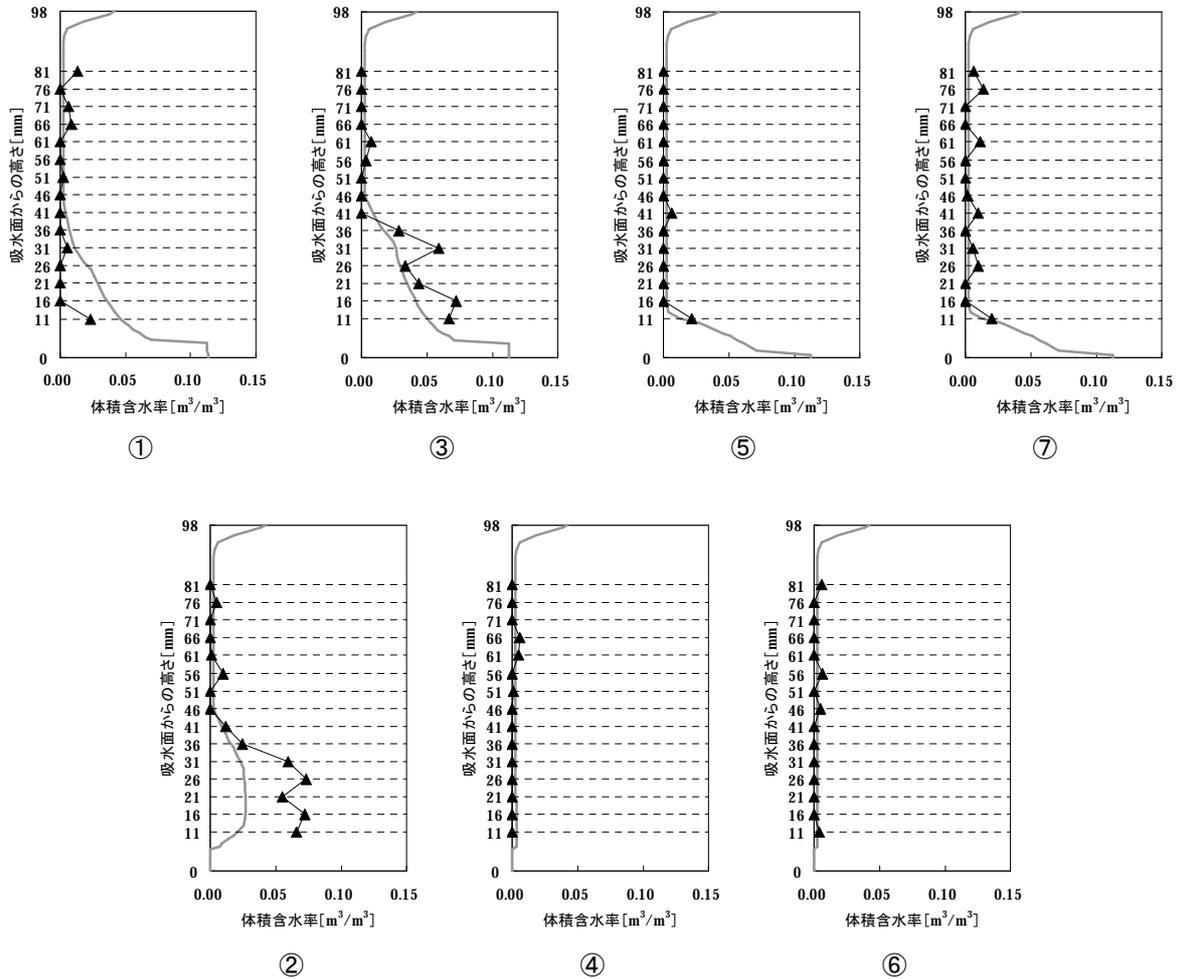
(b) ①～⑦の位置における含水率分布と測定結果 (試験体 No3) との比較

図 8.16 吸水開始 24 時間 (1 日) 後の計算結果



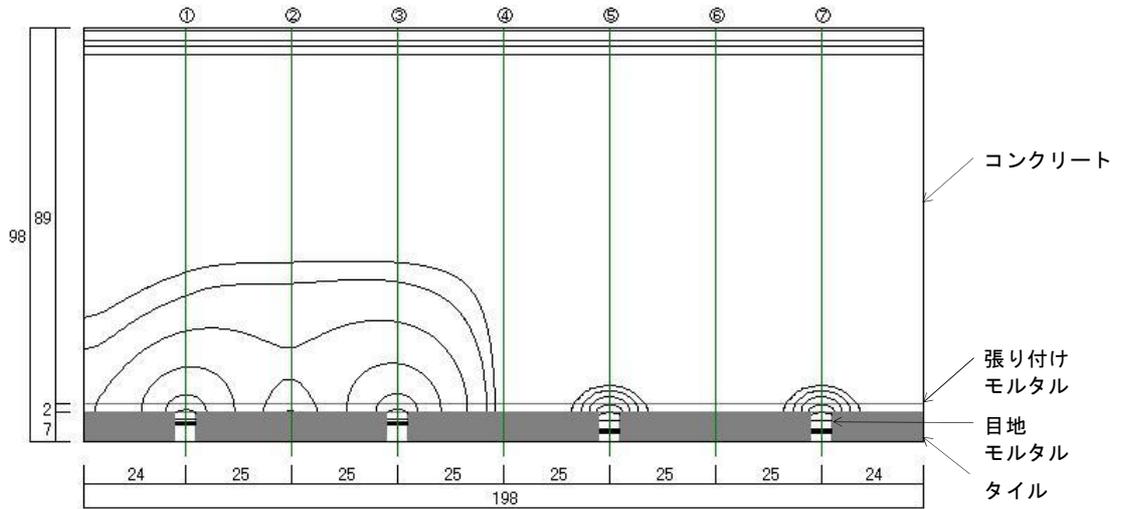
(a) 平面分布

太線：計算結果、細線とシンボル：測定結果 (▲：試験体 No3)



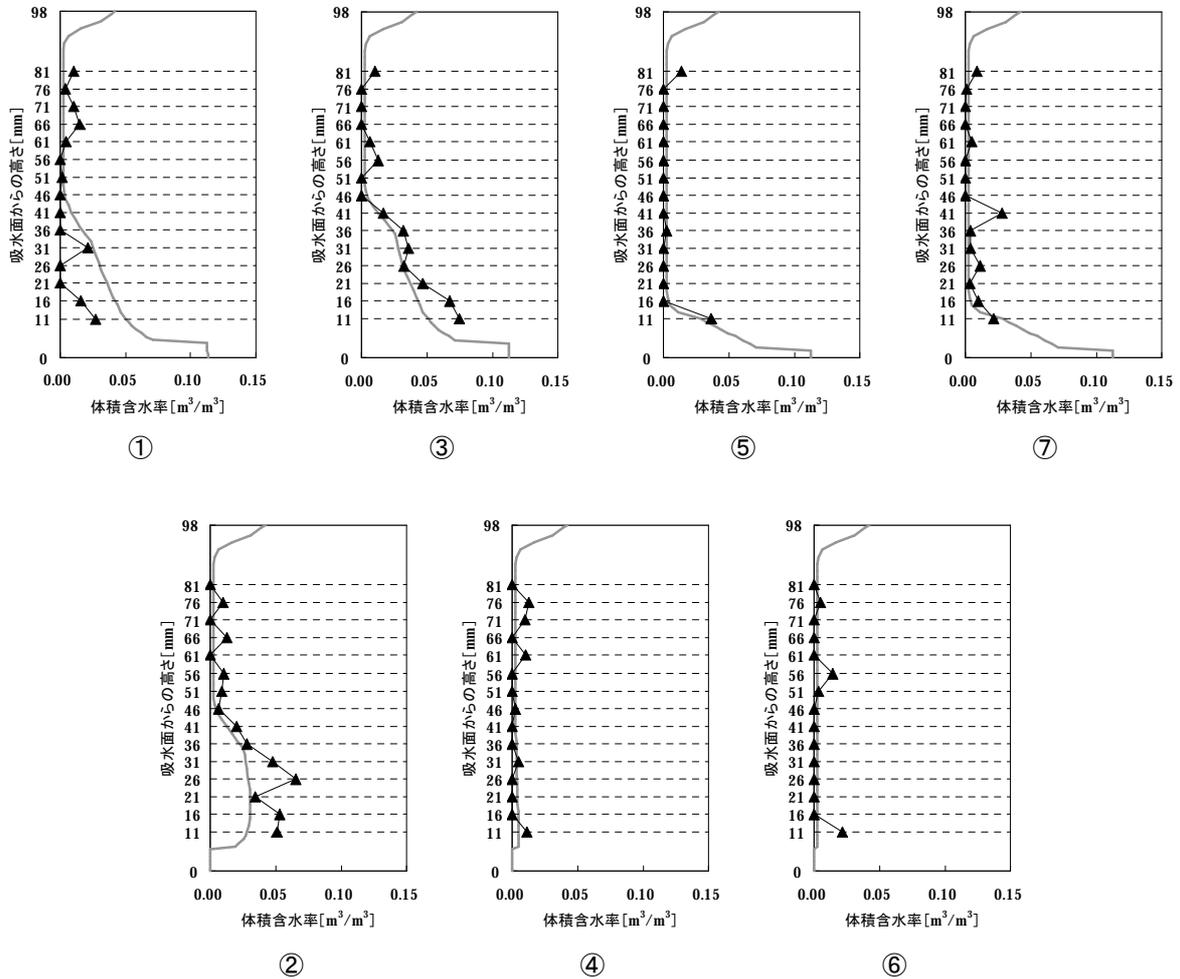
(b) ①～⑦の位置における含水率分布と測定結果 (試験体 No3) との比較

図 8.17 吸水開始 120 時間 (5 日) 後の計算結果



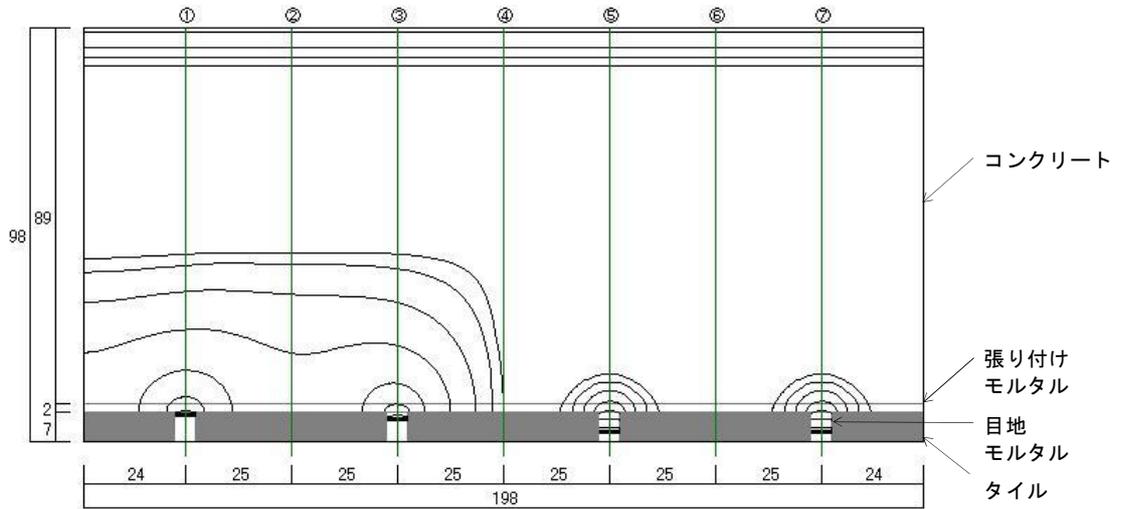
(a) 平面分布

太線：計算結果、細線とシンボル：測定結果 (▲：試験体 No3)



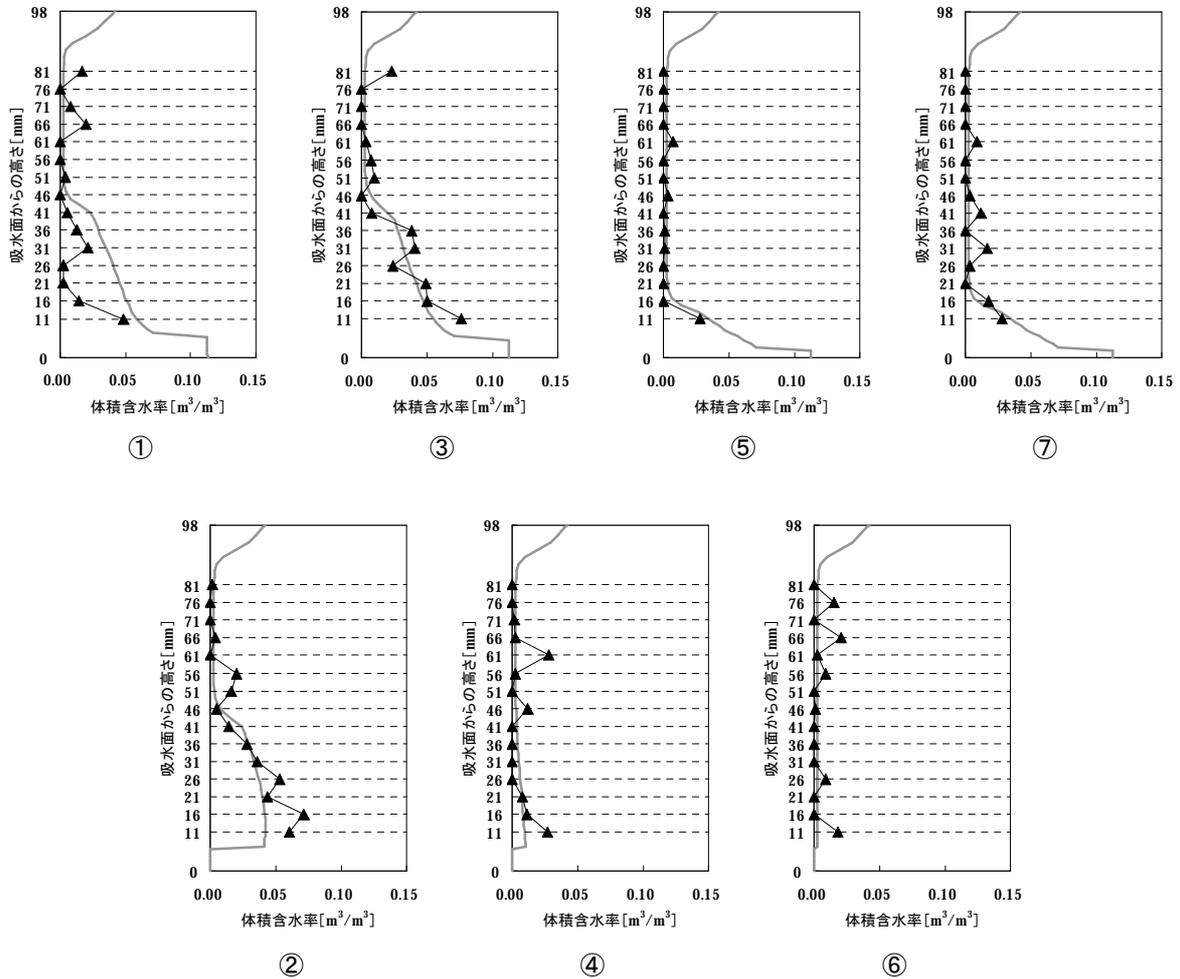
(b) ①～⑦の位置における含水率分布と測定結果 (試験体 No3) との比較

図 8.18 吸水開始 240 時間 (10 日) 後の計算結果



(a) 平面分布

太線：計算結果、細線とシンボル：測定結果 (▲：試験体 No3)



(b) ①～⑦の位置における含水率分布と測定結果 (試験体 No3) との比較

図 8.19 吸水開始 480 時間 (20 日) 後の計算結果

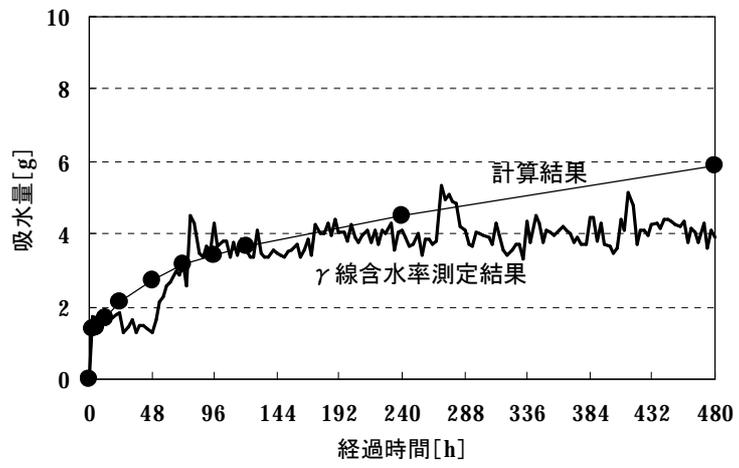


図 8.20 吸水量の比較 (試験体 No3)

試験体 No1 についてはさらに加熱によってタイルに浮きが生じたものと仮定した。

吸水開始直後短時間で、水分はタイルと目地モルタルの隙間を通り、張り付けモルタルとコンクリートの上に溜まるものとし、図 8.21 に示すように、目地①近傍（点線で図示）に第 1 種境界条件を用いて計算を行った。その結果、図 8.22～図 8.26 に示すように含水率の計算結果と測定結果との関係は一致する方向へ改善された。また、図 8.27 に吸水量の比較を示すが、浮きを考慮しない場合よりも良く一致している。

以上、実験および解析結果から、 γ 線含水率測定における試験体 No1 および No3 は乾燥時に加熱の影響を受け、試験体 No1 については乾燥後すでに目地①近傍のタイルが浮いていたと判断できる。また、加熱の影響による水分伝導率の変化や、浮きが含水率分布に及ぼす影響はかなり大きいと考えられる。

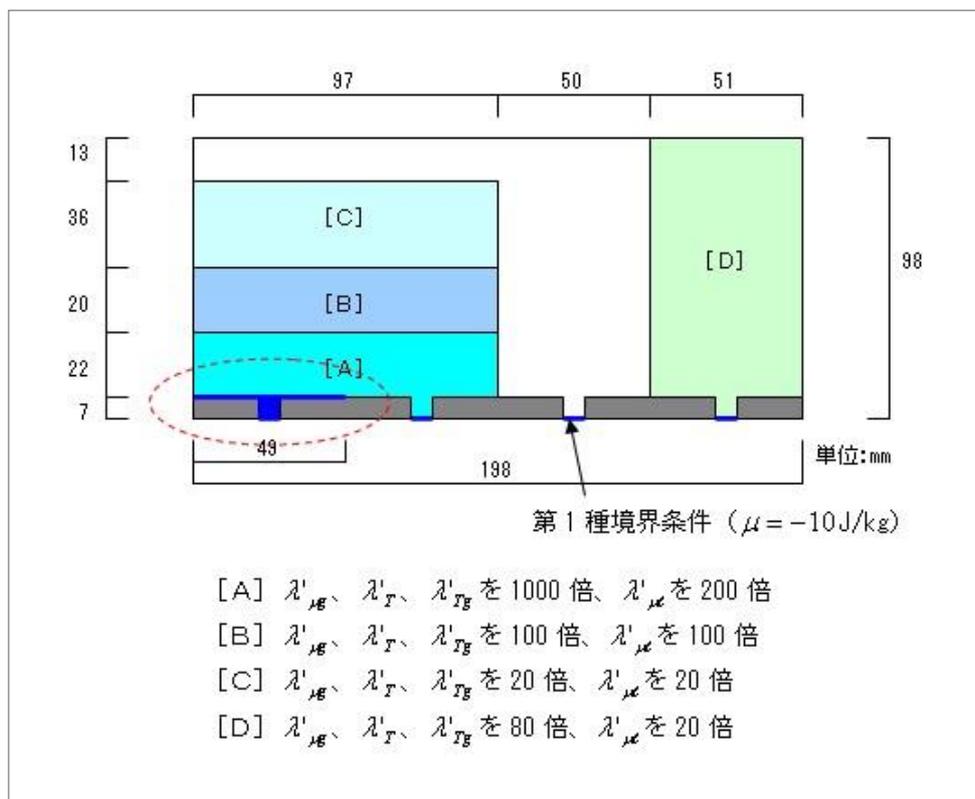
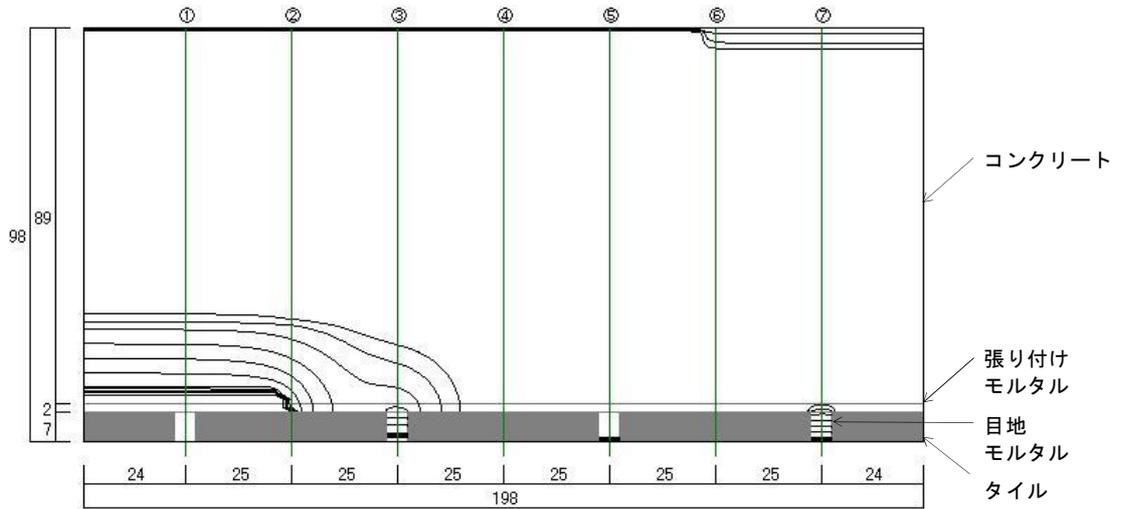
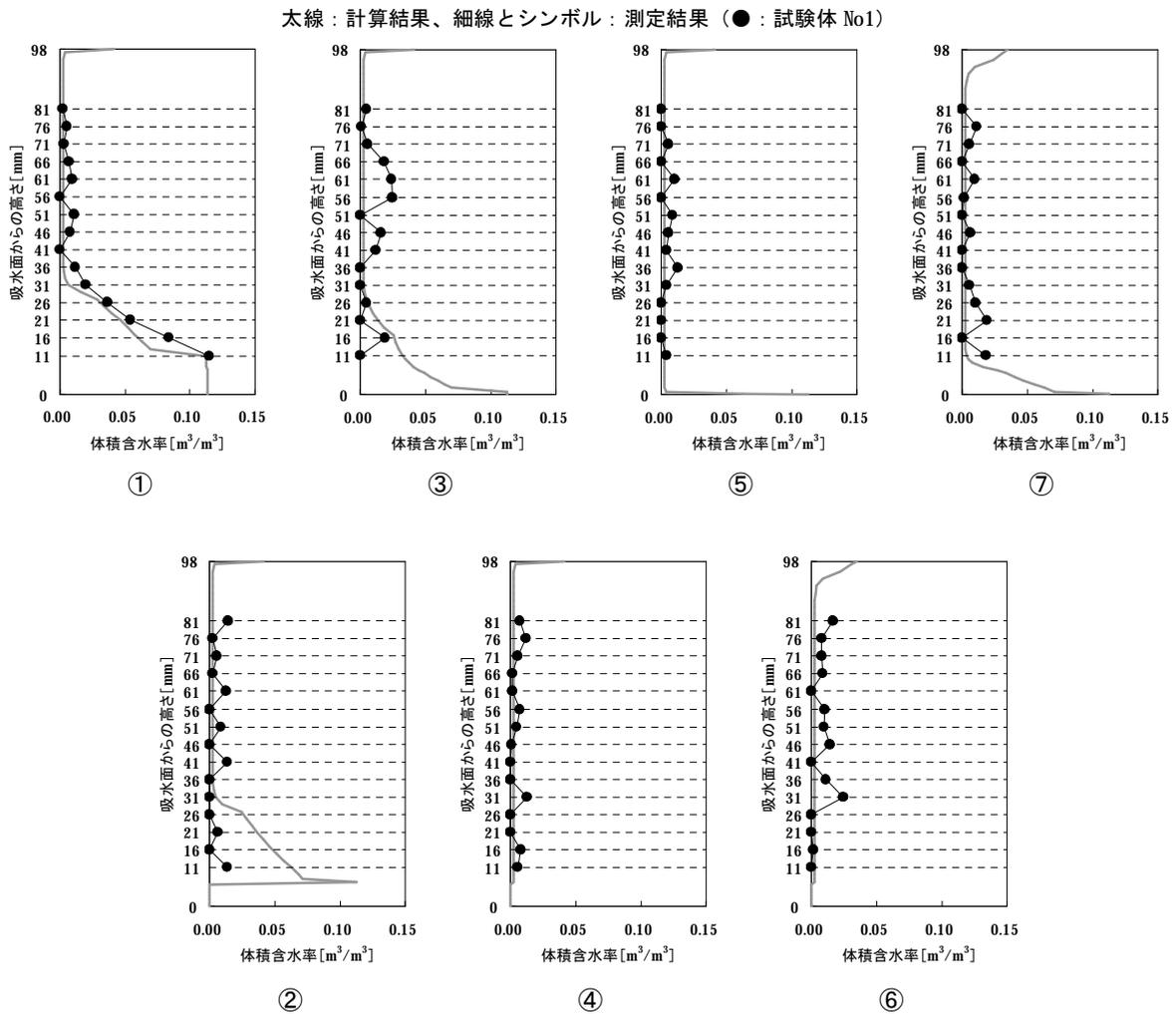


図 8.21 計算に用いた水分伝導率（試験体 No1）、浮きがあったと仮定した場合

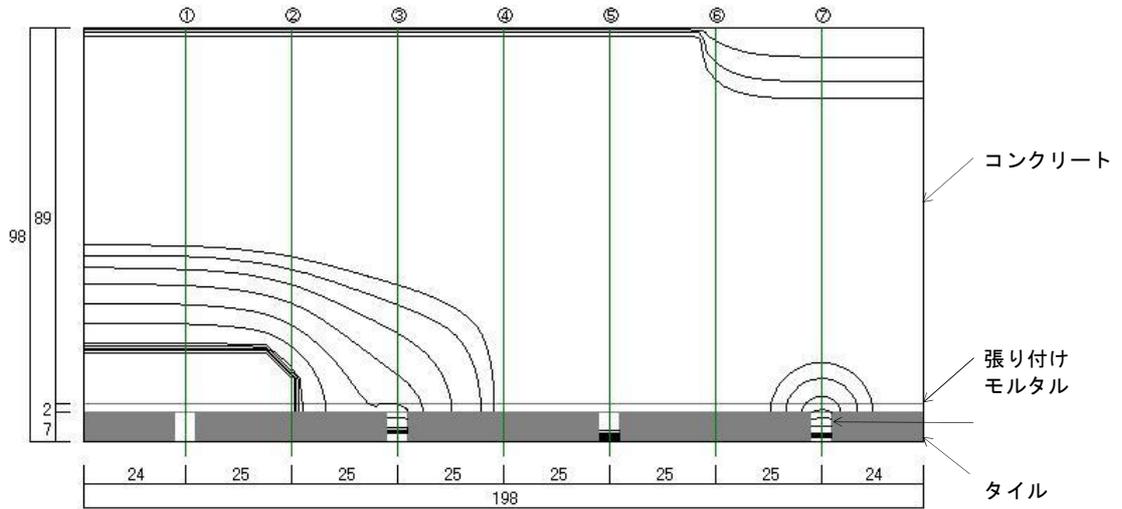


(a) 平面分布

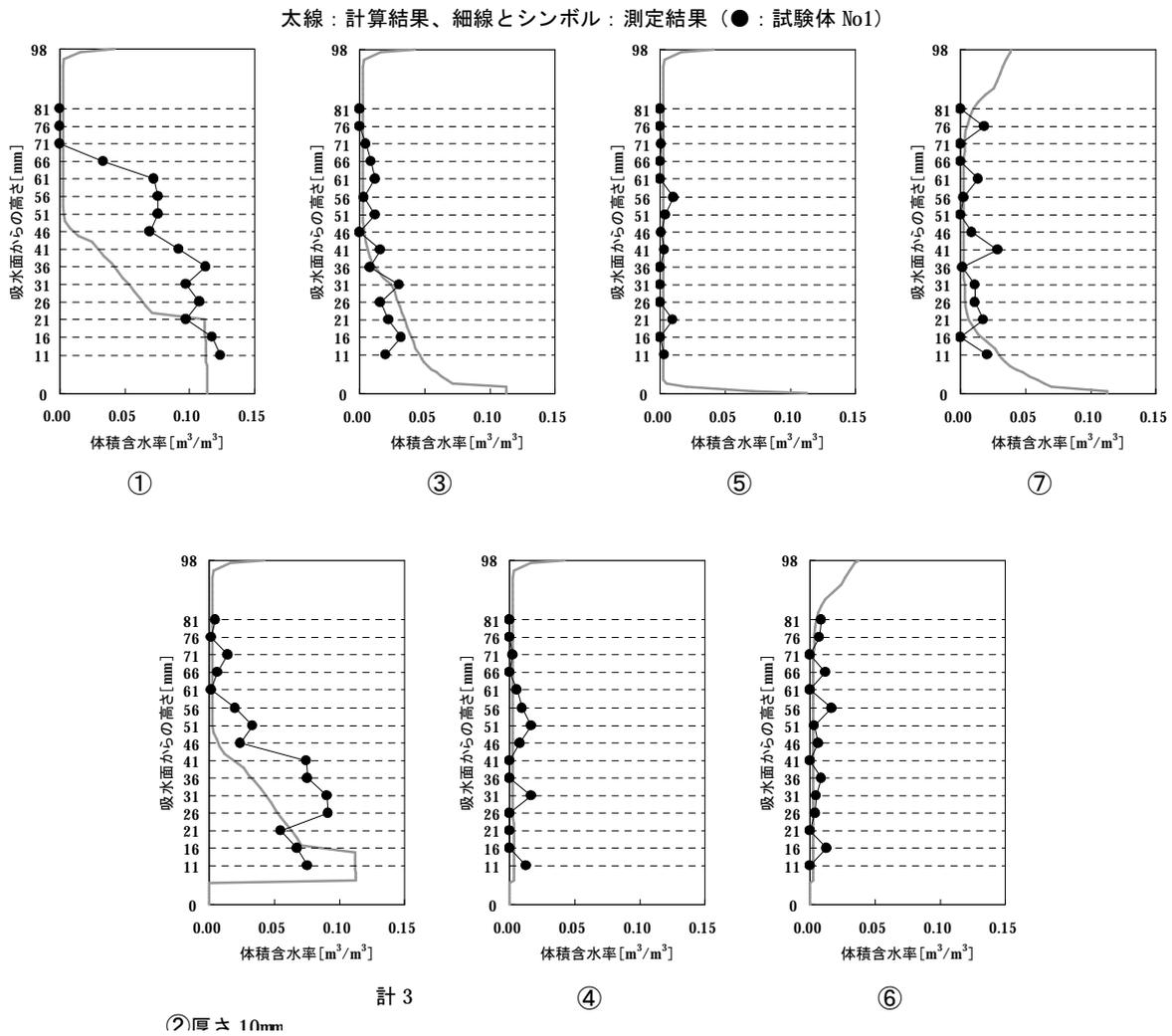


(b) ①～⑦の位置における含水率分布と測定結果 (試験体 No1) との比較

図 8.22 吸水開始 3 時間後の計算結果 (浮きがあったと仮定した場合)

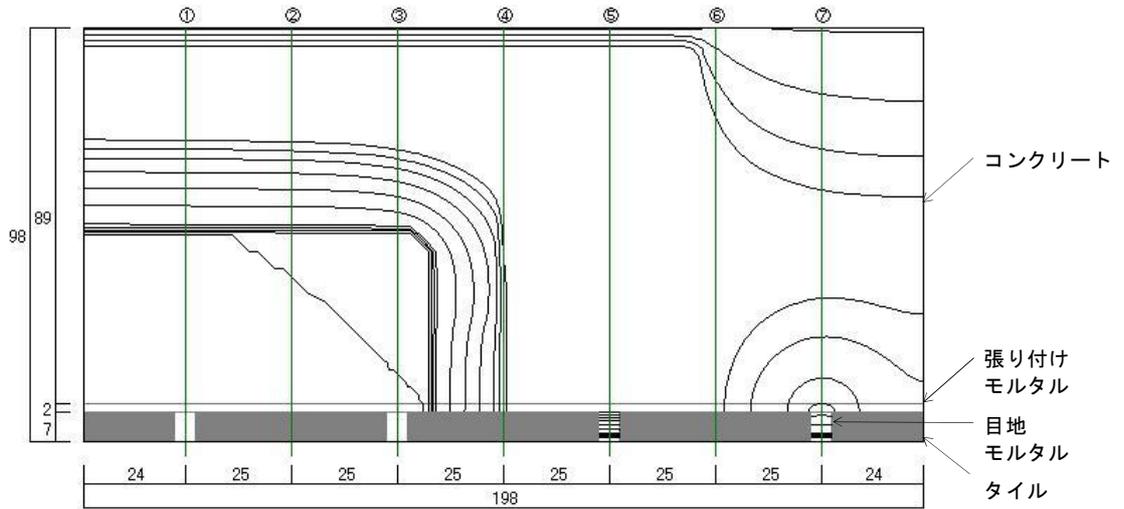


(a) 平面分布



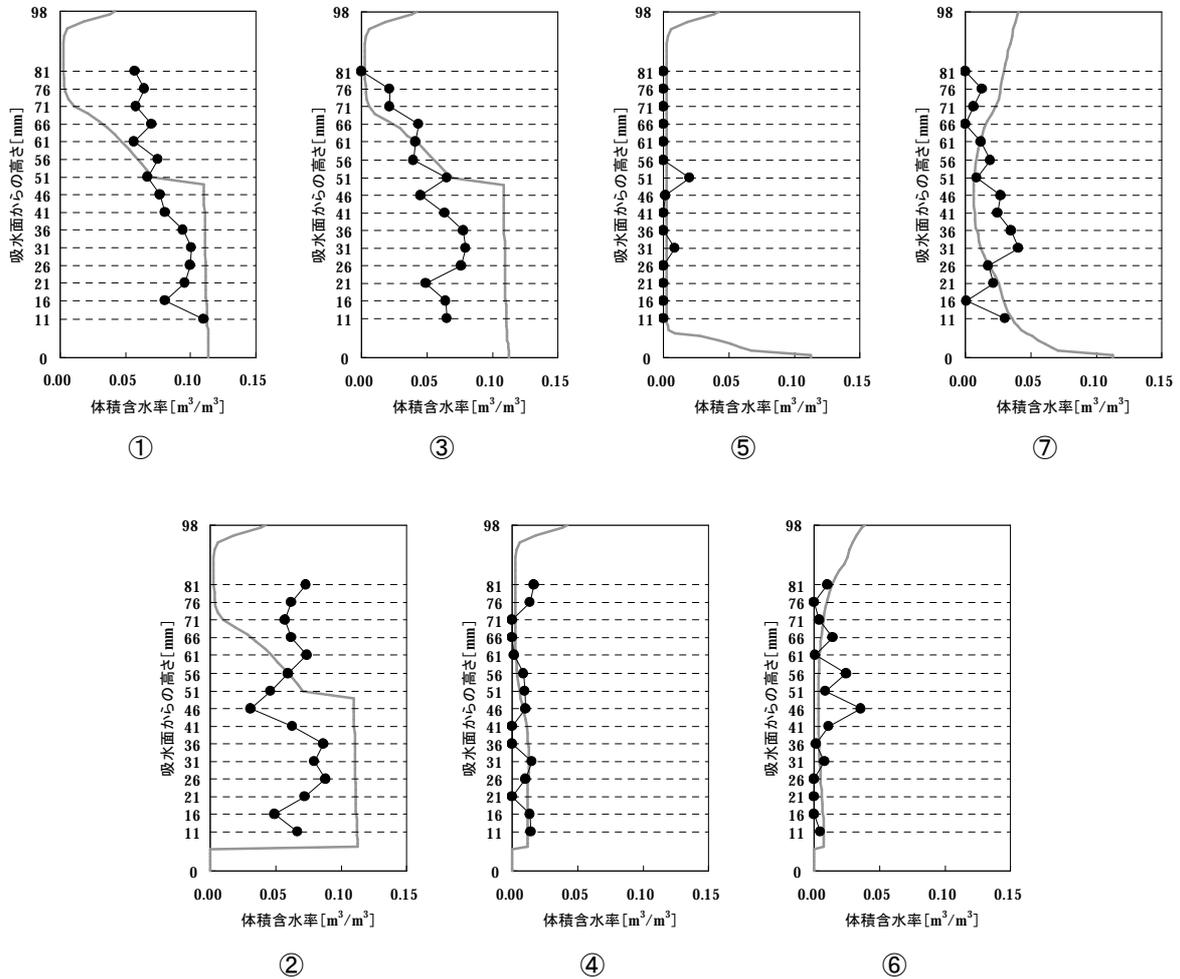
(b) ①～⑦の位置における含水率分布と測定結果 (試験体 No1) との比較

図 8.23 吸水開始 24 時間 (1 日) 後の計算結果 (浮きがあったと仮定した場合)



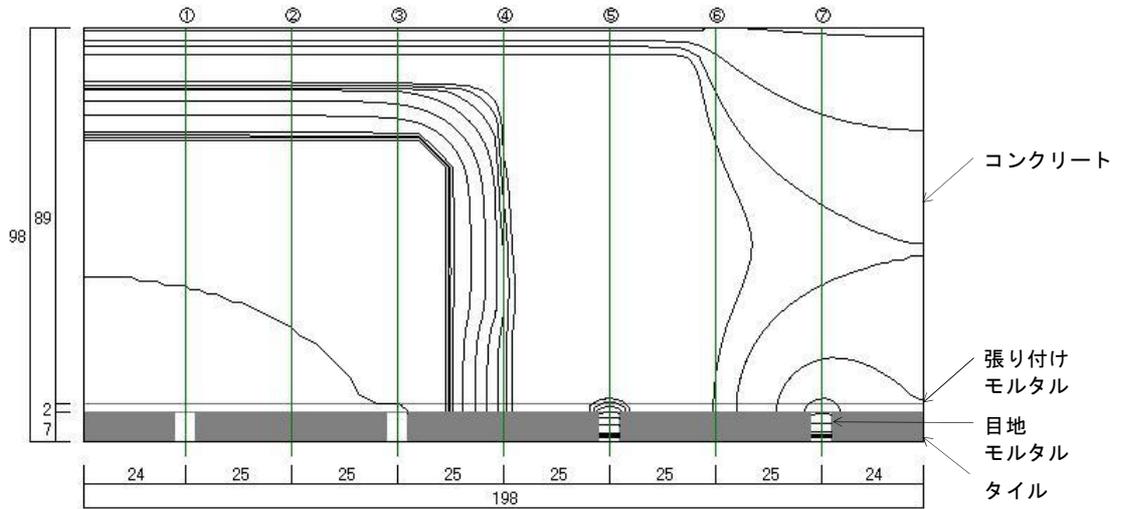
(a) 平面分布

太線：計算結果、細線とシンボル：測定結果 (●：試験体 No1)

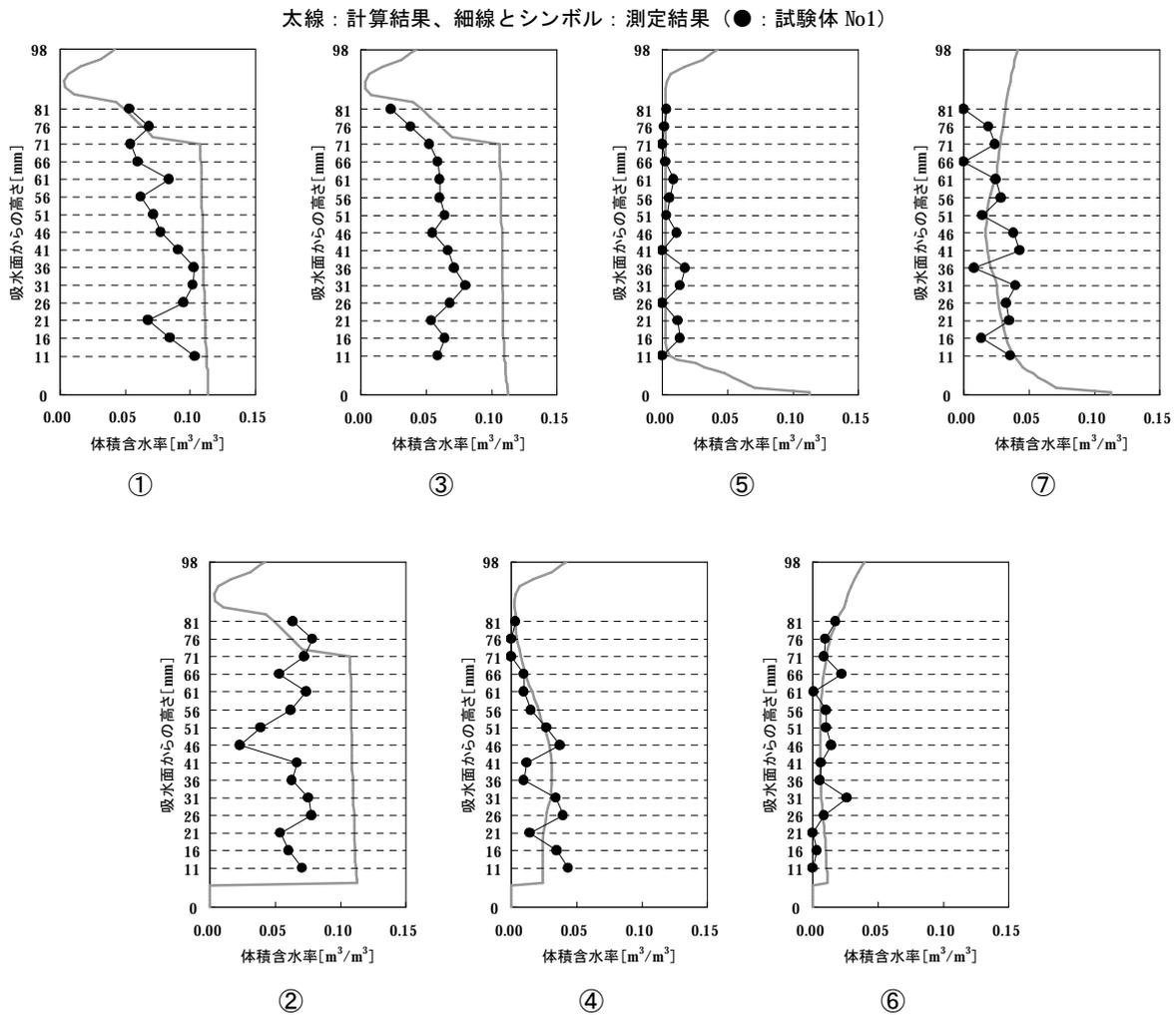


(b) ①～⑦の位置における含水率分布と測定結果 (試験体 No1) との比較

図 8.24 吸水開始 120 時間 (5 日) 後の計算結果 (浮きがあったと仮定した場合)

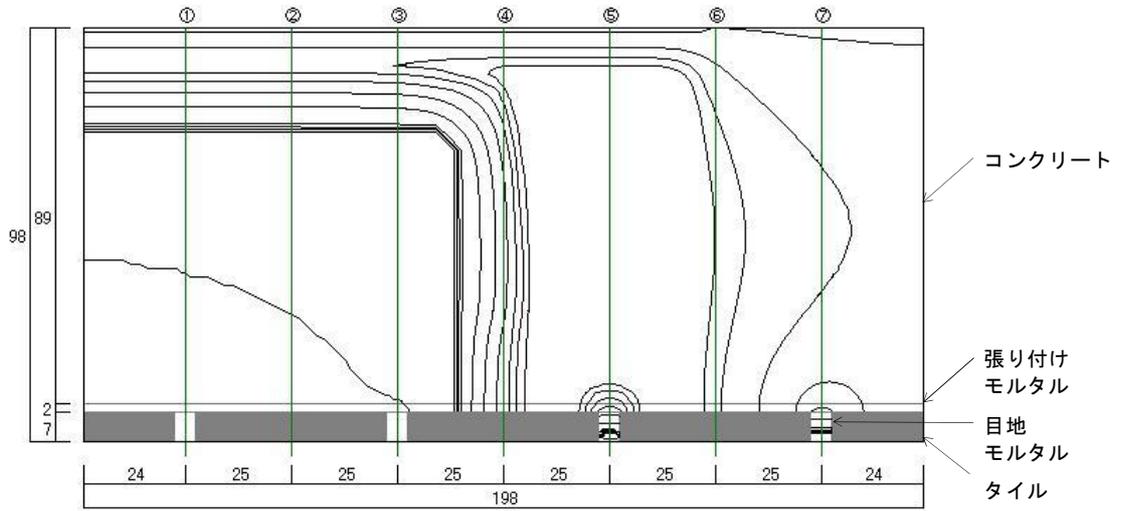


(a) 平面分布

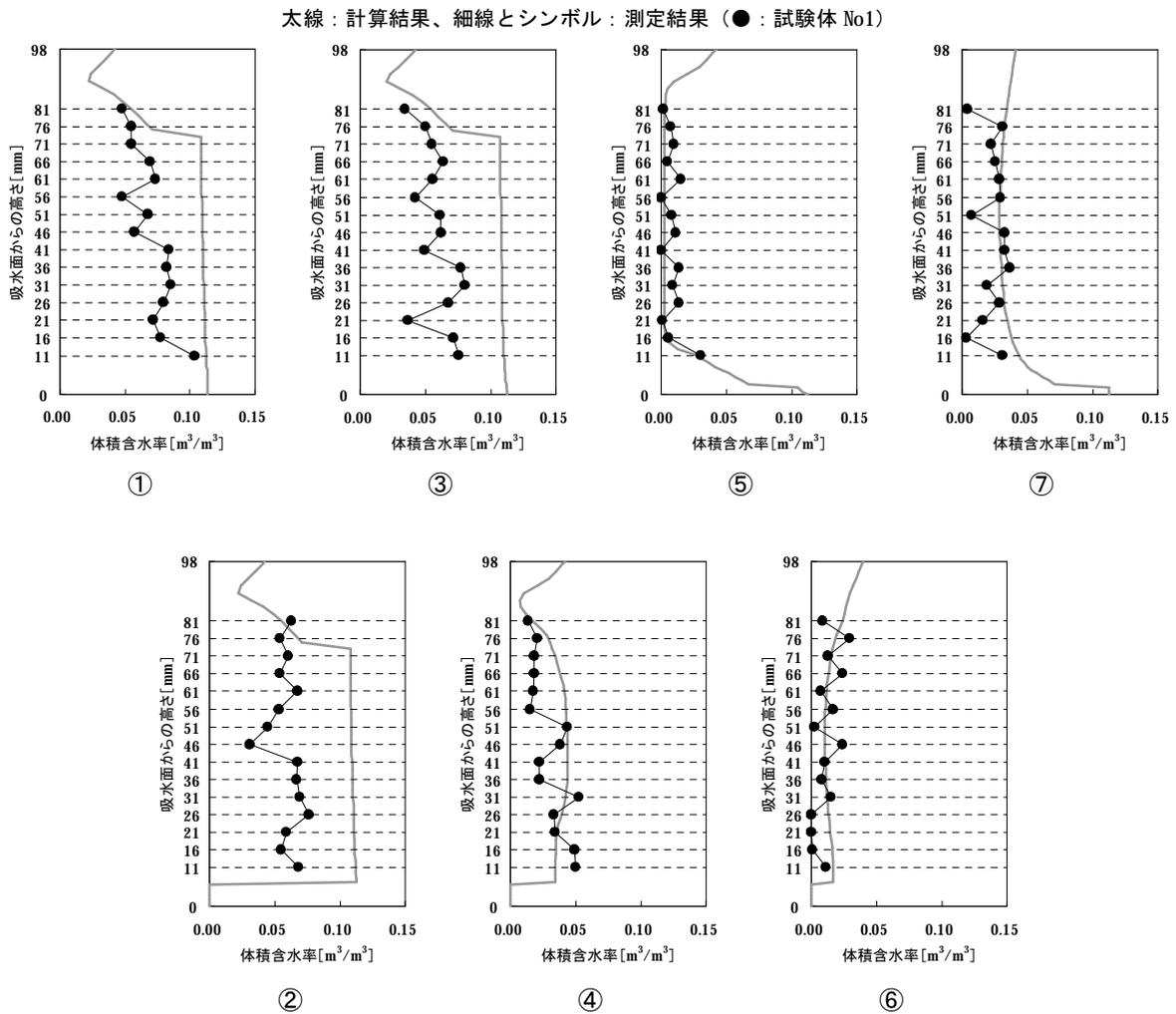


(b) ①～⑦の位置における含水率分布と測定結果 (試験体 No1) との比較

図 8.25 吸水開始 240 時間 (10 日) 後の計算結果 (浮きがあったと仮定した場合)



(a) 平面分布



(b) ①～⑦の位置における含水率分布と測定結果 (試験体 No1) との比較

図 8.26 吸水開始 480 時間 (20 日) 後の計算結果 (浮きがあったと仮定した場合)

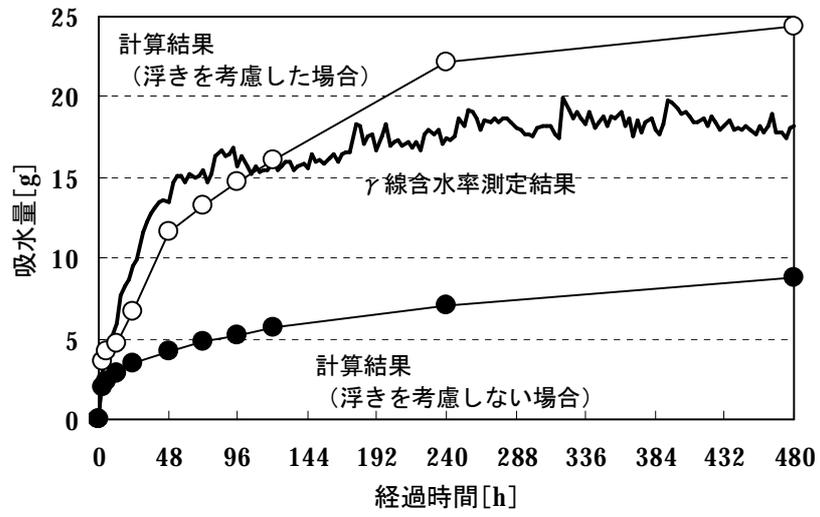


図 8.27 吸水量の比較 (試験体 No1)

8-6 今後の課題

実際のタイルが張られたコンクリート壁体は、日射や天空放射、外気温変動などによって加熱・冷却が繰り返される。その際に生じる熱応力の影響により、特に応力が大きくかかる部分や強度の弱い部分でタイルの浮きが生じ始める。同時に、外表面に近いコンクリート内部では微小クラックが生じるなど、空隙構造が変化する。これら、浮きやクラックに雨水などの水分が浸透すると、乾燥時に働く収縮応力などが熱応力に加わり、さらに浮きの範囲が拡大する。これら熱と水分の影響が繰り返され、やがてはタイルの剥離に至ると考えられる。タイルが剥離に至るメカニズムがこれだけに限られるわけではないが、事例としては比較的多い [1]。

第4章の吸水実験における試験体 No1 および試験体 No3 での実験および解析結果は、極端な加熱のみの影響ではあるが、上記のような一部で空隙構造が変化した壁体、さらに一部のタイルに浮きが生じた壁体における水分移動を近似的に再現したものと言え、そのような壁体についても解析により水分移動の予測が可能と考えられる。しかしながら、空隙構造の変化および浮きの発生から進行する過程に対応する水分移動の性状変化については不明であり、その検討が今後必要である。

真夏の午後で気温が 36℃程度と高く、風もなく、強い日射が壁面に当たり、壁面の日射吸収率が 0.9 程度と高く、外断熱された西面の壁体（コンクリート躯体+断熱材+張り付けモルタル+タイル）の場合、壁体表面の温度は 90℃程度まで上昇する。このように、条件によって壁体表面の温度がかなり高温になる壁体は、本章の実験結果から浮きの発生が早期に起こる可能性が高いと推察され、壁体表面の温度を上昇させないような設計が必要となる。ただし、このことについても十分な検証が必要である（現在、実験中にある）。

また、上記のように壁体の温度上昇が大きい場合は、浮きの発生の要因として熱応力だけでなく内部圧力の変化による影響も考える必要があり、その検討についても今後の課題と言える。

なお、各試験体における加熱の影響度の違い（試験体 No2 への影響度は小さく、試験体 No1 および No3 への影響度は大きい。特に試験体 No1 はタイルの浮きが生じた可能性がある）は、材料特性のばらつきと施工のばらつきが相互に関係して生じたと考えられる。

8-7 本章のまとめ

本章では、第4章の吸水実験で加えられた試験体作成時の切断による振動および試験体を乾燥させたときの加熱が、水分移動に関する物性値とタイルの浮きに及ぼす影響を検討した。

簡易な実験および解析の結果から、以下のことが分かった。

- ・試験体 No1 および試験体 No3 については加熱による影響を受け、水分伝導率が大きく変化した可能性が高い。
- ・試験体 No1 についてはさらにタイルに浮きが生じていた可能性が高い。
- ・試験体 No1 および試験体 No3 とも振動による影響は非常に小さかった。

なお、水分浸透および含水率の変化が小さかった試験体 No2 は、振動および加熱による影響をほとんど受けていなかったと考えられる。

また、本章では今後の課題についても述べた。

第9章 結論

本論では、一般的なタイル張り仕上げが施されたコンクリート造建物の外壁を対象に、水分移動の挙動を把握すると同時に、解析による予測を可能にすることを目的に、以下に示す測定、実験および解析を行った。

第1章では、多孔質材料内部における熱水分移動の理論解析に関する研究と、仕上げがあるコンクリート壁体への水分浸透およびコンクリート壁体内部における熱水分の移動性状に関する研究のレビューを行った。また、解析に用いられるコンクリートの熱水分移動に関する物性値の問題についてもふれた。

第2章では、第5章以降の解析で用いる熱水分移動の基礎方程式を提示した。ここで用いられる熱水分移動の駆動力は温度および水分化学ポテンシャルである。また、数値計算方法についても簡潔に述べた。

第3章では、現在、一般的に用いられている強度の異なる3種類のコンクリート（Fc27、Fc33、Fc40）について、湿気伝導率、平衡含水率、透水係数および熱伝導率の測定を行った。

その結果、(1)コンクリートの湿気伝導率と透水係数は強度が高くなるほど小さくなる傾向にある、(2)コンクリートにはヒステリシス（履歴）現象が存在する、(3)コンクリートの熱伝導率は含水率の増加にともない大きくなる、(4)コンクリートは熱湿気物性に比較的大きなばらつきを有する材料である、(5)コンクリートの透水係数は比較的ばらつきが大きい、(6)コンクリートの透水係数は強度が低いほどばらつきが大きくなる傾向がある、(7)水分移動に関する物性値のばらつきは強度が低いほど、含水率が高いほど大きい、などの知見を得た。

また、湿気伝導率の測定結果から気液の同時移動について考察し、コンクリートは比較的低湿度であっても気相水分だけではなく液相水分の移動も生じていることを明らかにした。

国内外の文献値との比較では、今回の測定は、比較的新しい年代の文献値と類似した結果であった。

以上から、解析を行う際には、(1)使用材料、調合、強度が同一の（または、なるべく近い）コ

ンクリートの測定結果を用いること、(2)強度や温度および含水率による変化を考慮した熱湿気物性値を用いること、(3)熱湿気物性値のばらつきを考慮して評価すること、に留意する必要がある。

第4章では、タイル張り仕上げが施されたコンクリート壁体への水分浸透および壁体内での水分移動の挙動を知るために、一般的なタイル張り仕上げが施されたコンクリート壁体を模した試験体を用いて、等温下で吸水実験を行った。測定装置には非破壊で含水率の測定が可能な γ 線含水率測定装置を用いた。

その結果、実験に用いた3体の試験体は、切断以前には隣接していたにもかかわらず、それぞれが異なった水分移動性状を示した。この原因を次章以降の解析によって検討した。

第5章では、第6章以降の解析に必要なコンクリートの水分化学ポテンシャル勾配および温度勾配に関する水分伝導率の気液分離方法について述べた。熱湿気物性の測定結果を用いた1次元非定常計算を湿気伝導率測定に対して行い、各試験片の重量変化の計算結果と測定結果との比較から水分伝導率の値を決定した。

第6章では、第5章で推定した水分伝導率を用いて2次元の非定常計算によって含水率の経時変化を算出し、測定結果と比較した。

その結果、吸水量が多く、含水率の上昇が大きかった試験体 No1 および試験体 No3 については、測定結果と計算結果との間に良好な一致が見られなかった。しかしながら、含水率の上昇が小さかった試験体 No2 については、測定結果の方が計算結果よりも若干数値が大きいものの、移動性状に関して類似した結果が得られた。

この結果を受け、第7章では、強度の違いや物性値のばらつきを考慮した解析を行った。

その結果、試験体 No2 の含水率変動の計算結果と測定結果との間に良好な一致が得られた。

このことより、タイル張り仕上げが施されたコンクリート壁体の水分移動性状の予測は、第3章の測定結果を用いた解析によって行え、強度の違いや物性値のばらつきを考慮することで、さらに精度の高い予測が可能と言える。

また、第7章での各種計算により、強度の違いや物性値のばらつきがコンクリート壁体への水分浸透に与える影響について、(1)水分伝導率の大きさは水分の移動速度に直接的に影響する、(2)平衡含水率曲線の傾きおよび形状は含水率分布の形状に大きく影響する、等の知見が得られた。これらは、物性値のばらつきをどの程度、かつ、どのように考慮するかを判断するうえで貴重な情報と

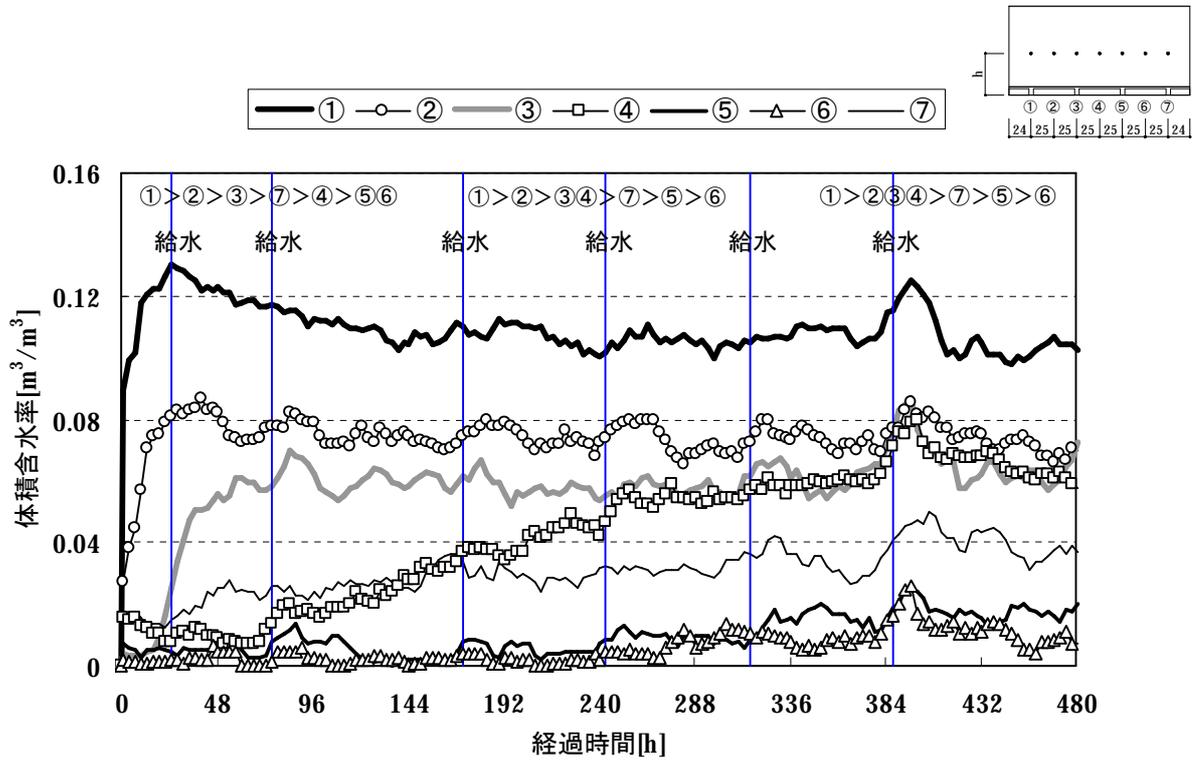
なる。

第8章では、試験体 No1 と試験体 No3 の水分移動速度が特に大きい原因として、試験体作成時の切断による振動および試験体を乾燥させたときの加熱を取り上げ、それらが水分移動に関する物性値とタイルの浮きに及ぼす影響を検討した。

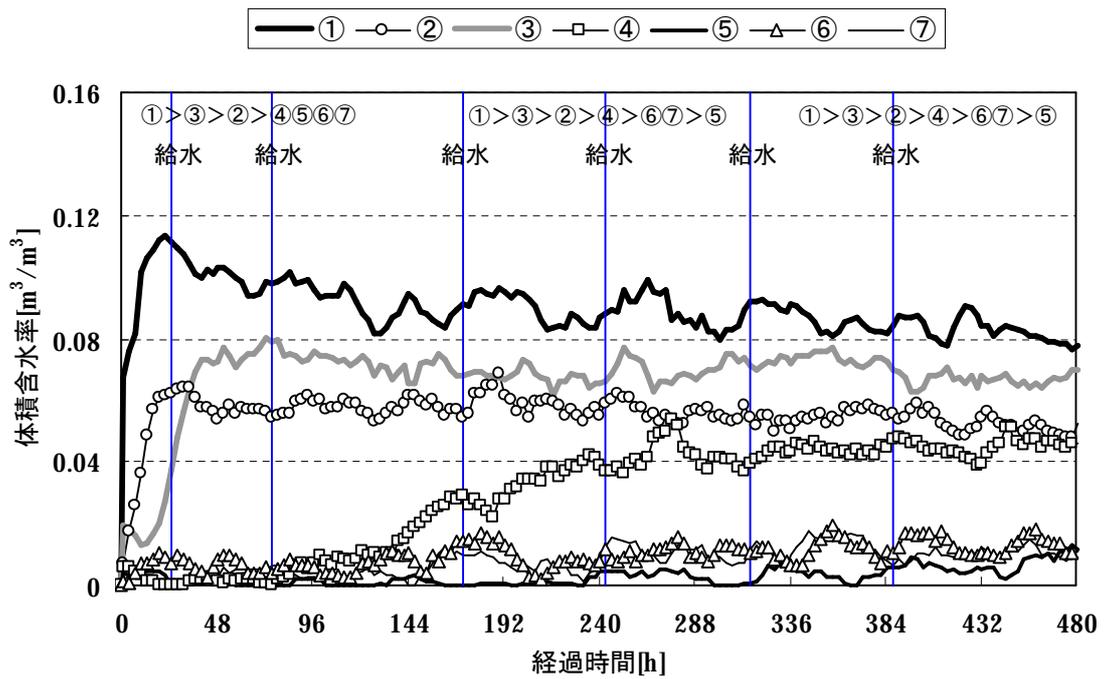
簡易な実験と解析の結果から、(1)試験体 No1 および No3 については、加熱による影響を受けて水分伝導率が大きく変化した、(2)試験体 No1 についてはさらにタイルに浮きが生じていた、と判断された。なお、水分浸透および含水率の変化が小さかった試験体 No2 は、振動および加熱による影響をほとんど受けていなかったと考えられる。

本論より、コンクリートの熱湿気物性の特徴が概ね明らかになった。また、提案した解析モデルにより、タイル張り仕上げが施されたコンクリート壁体における熱水分分布の予測が可能となった。これに基づき壁体に生じる温度応力、乾燥に伴う応力の算定がなされ、それらの応力と材料・施工分野における応力-歪関係に関するこれまでの知見の蓄積により、壁体の変形、ひび割れ、剥離の予測がかなりの精度で可能となる。したがって、ひび割れ・剥離と熱・水分物性との関連に関する本論文の結果とを結びつけることにより、将来は温度、日射、降雨などの外乱に対して、タイルの剥離とそれにもなう水分による壁体劣化の発生・進行の予測が可能になると考えられる。

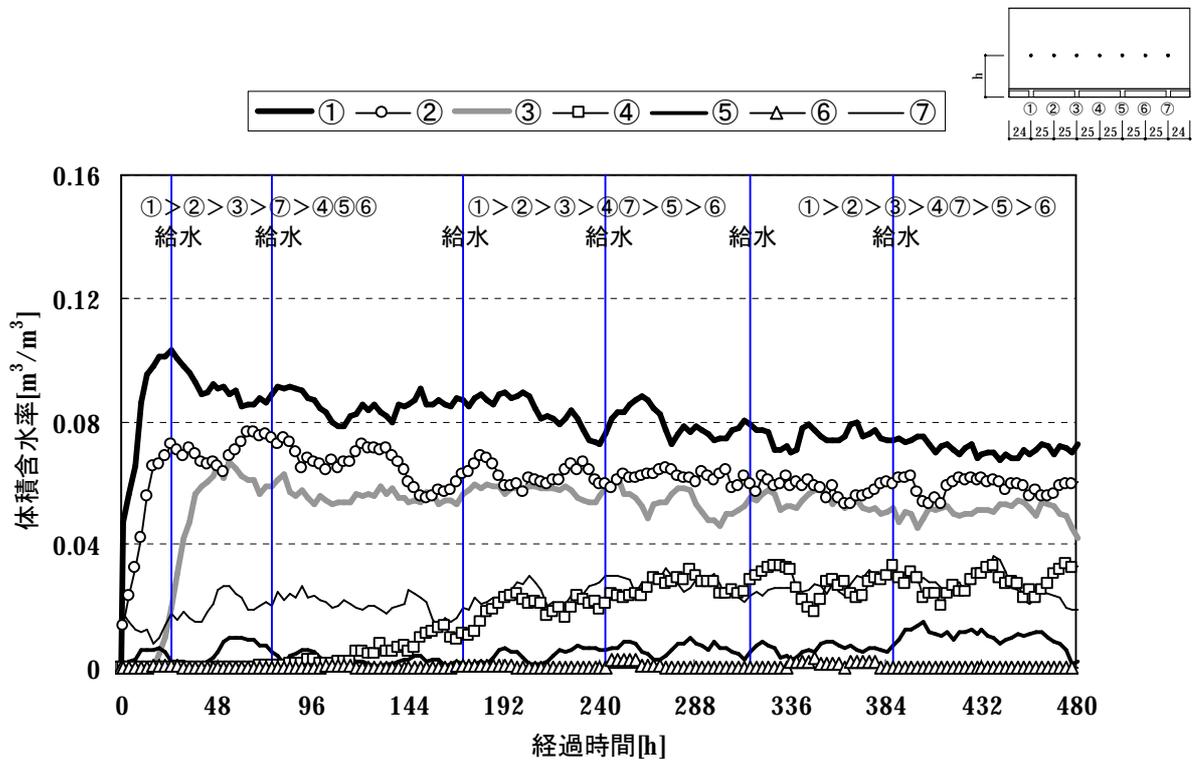
付録A-1 吸水実験の結果 試験体 No1 における体積含水率の経時変動



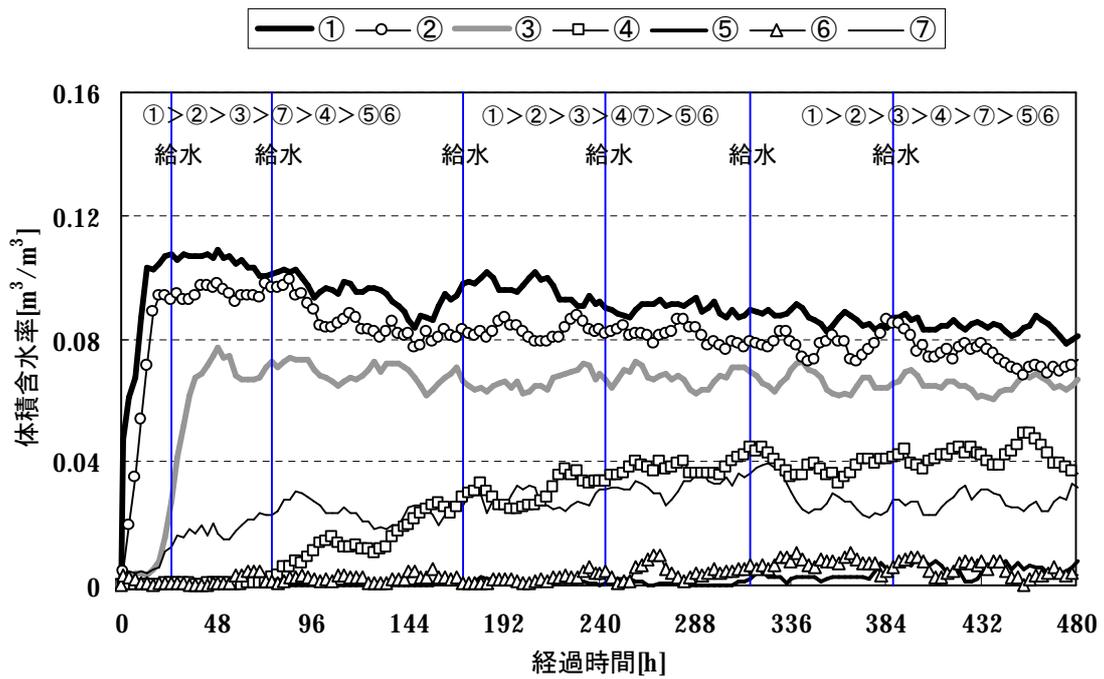
(a) h=11mm



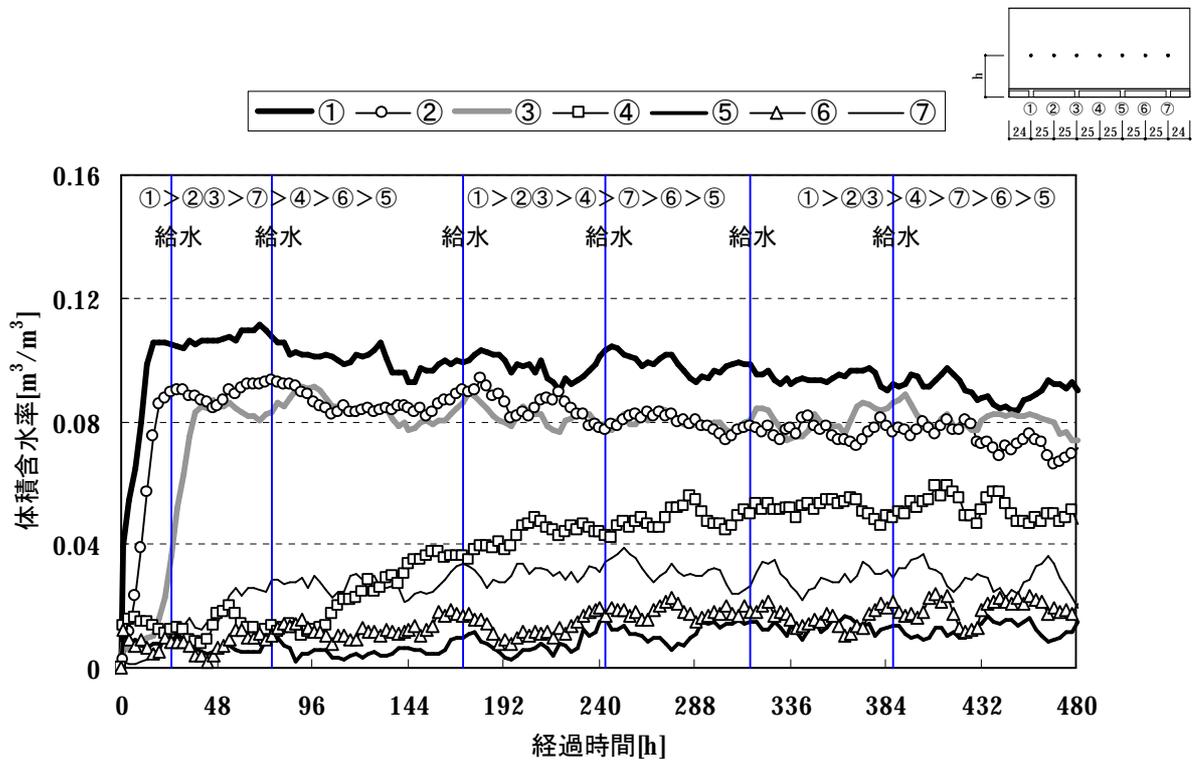
(b) h=16mm



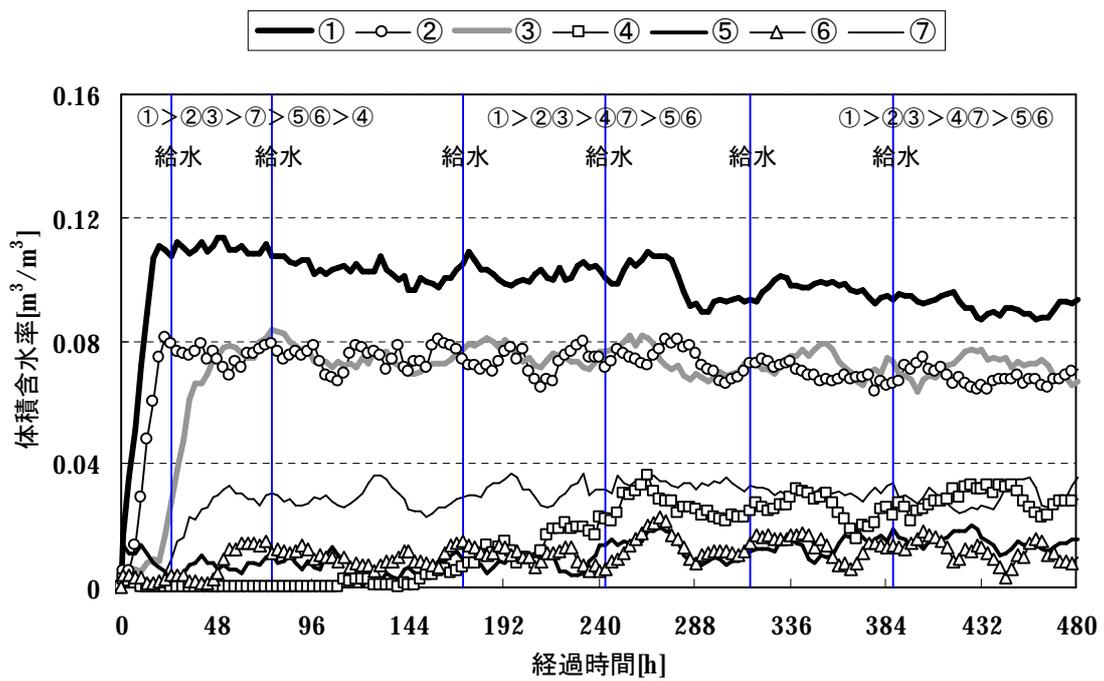
(c) $h=21\text{mm}$



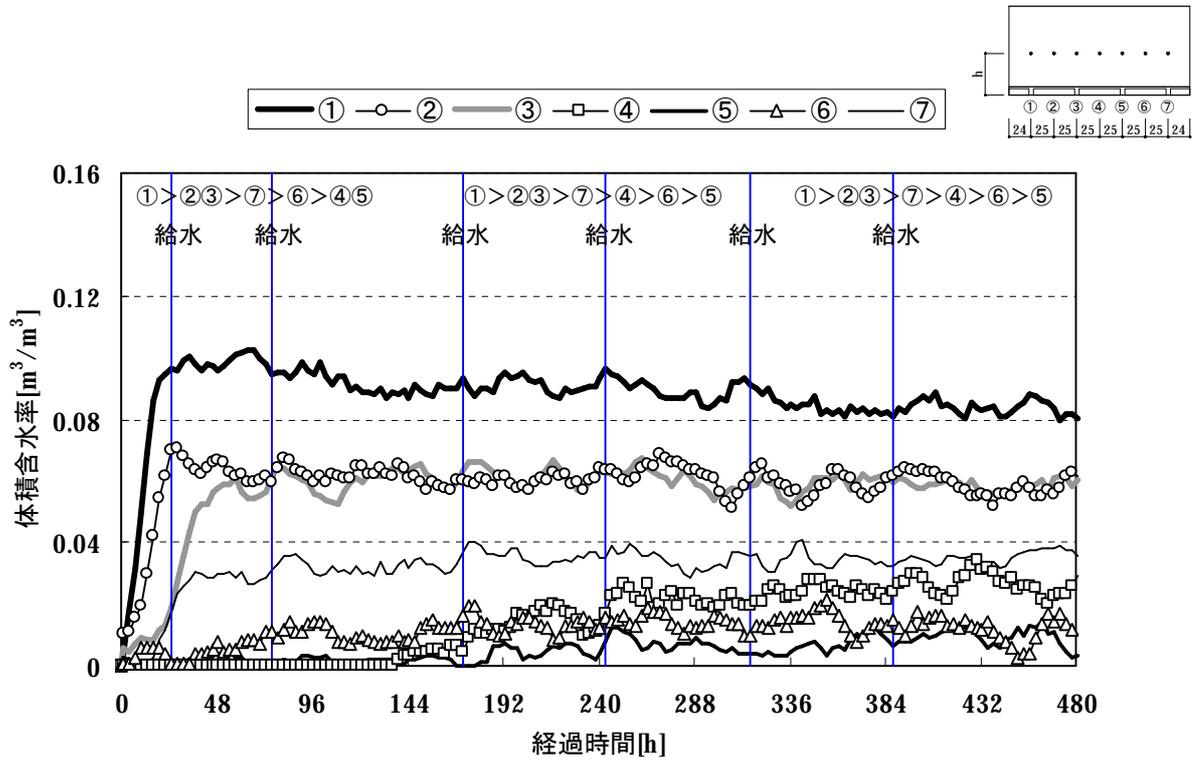
(d) $h=26\text{mm}$



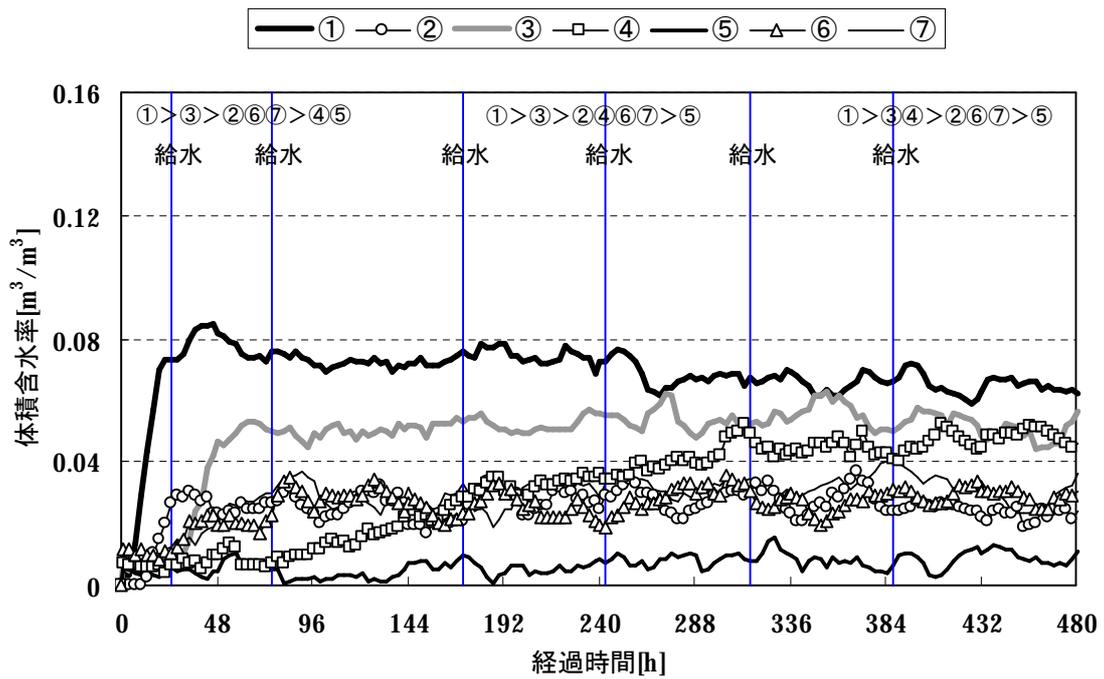
(e) $h=31\text{mm}$



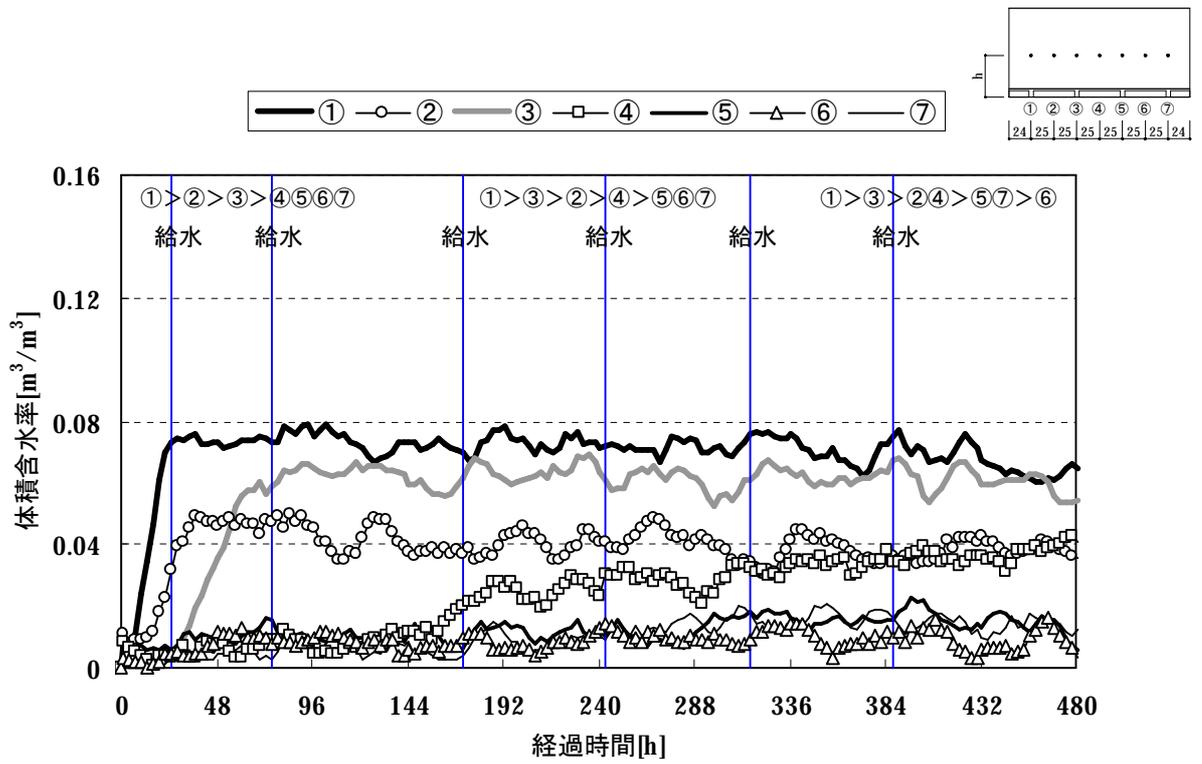
(f) $h=36\text{mm}$



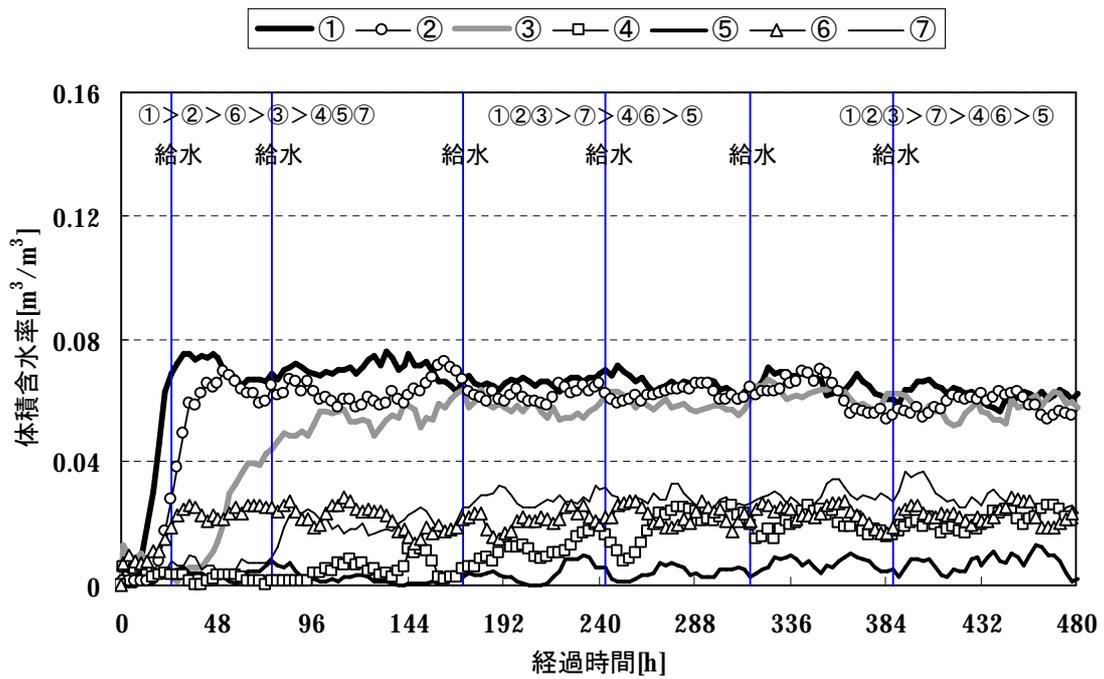
(g) $h=41\text{mm}$



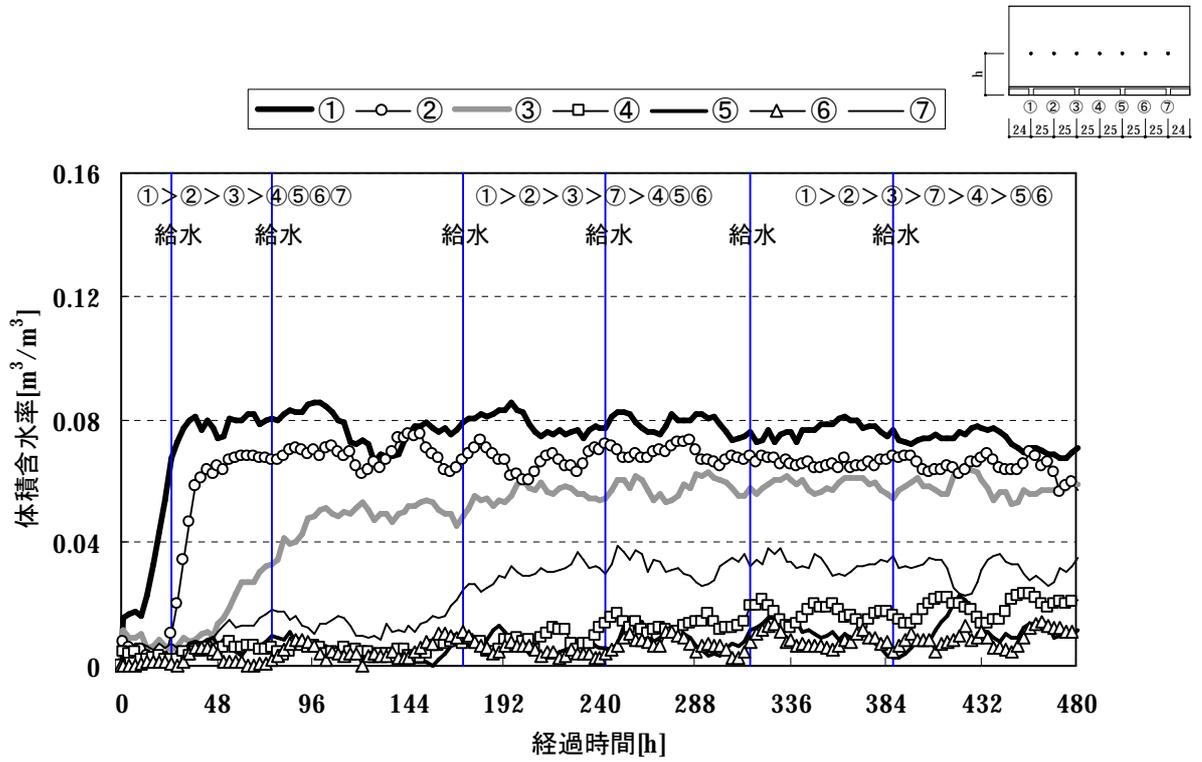
(h) $h=46\text{mm}$



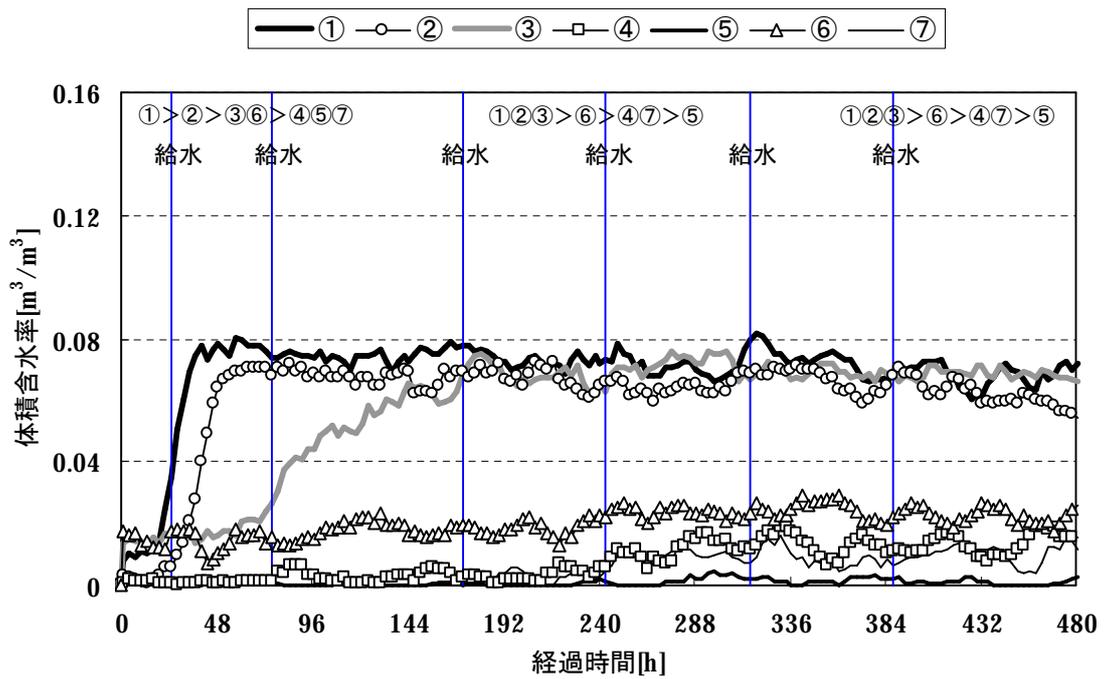
(i) $h=51\text{mm}$



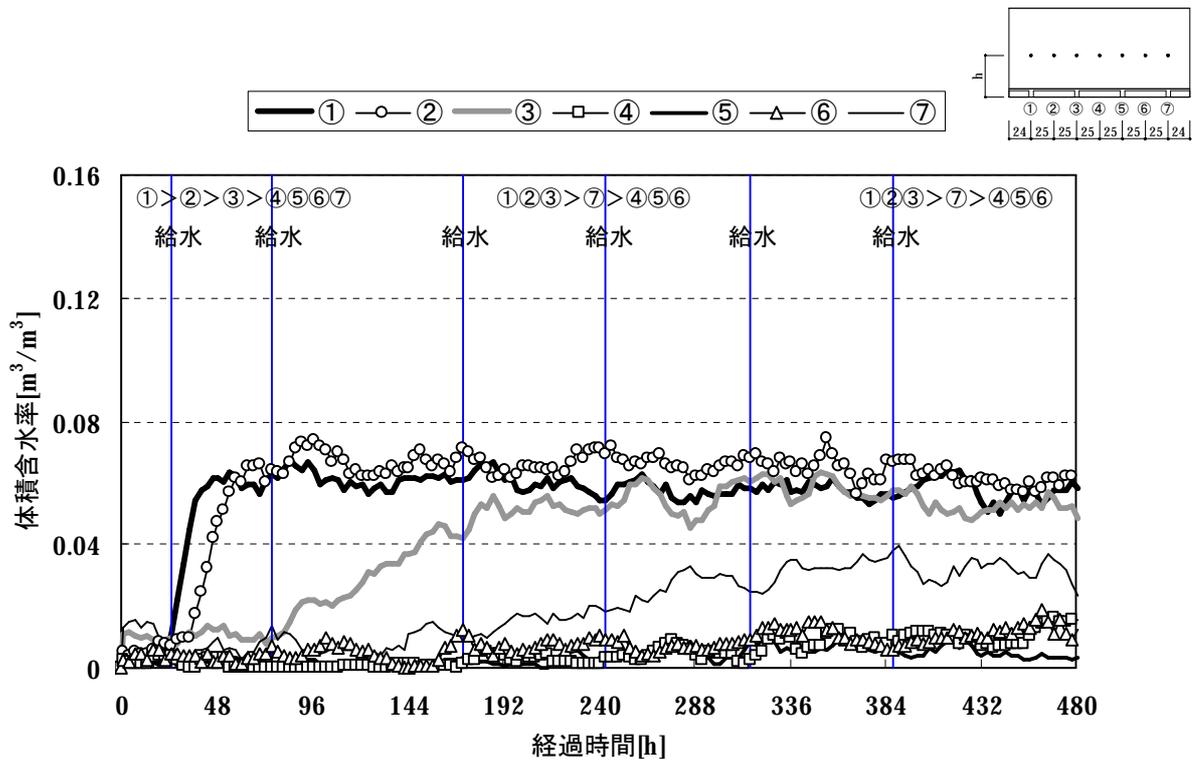
(j) $h=56\text{mm}$



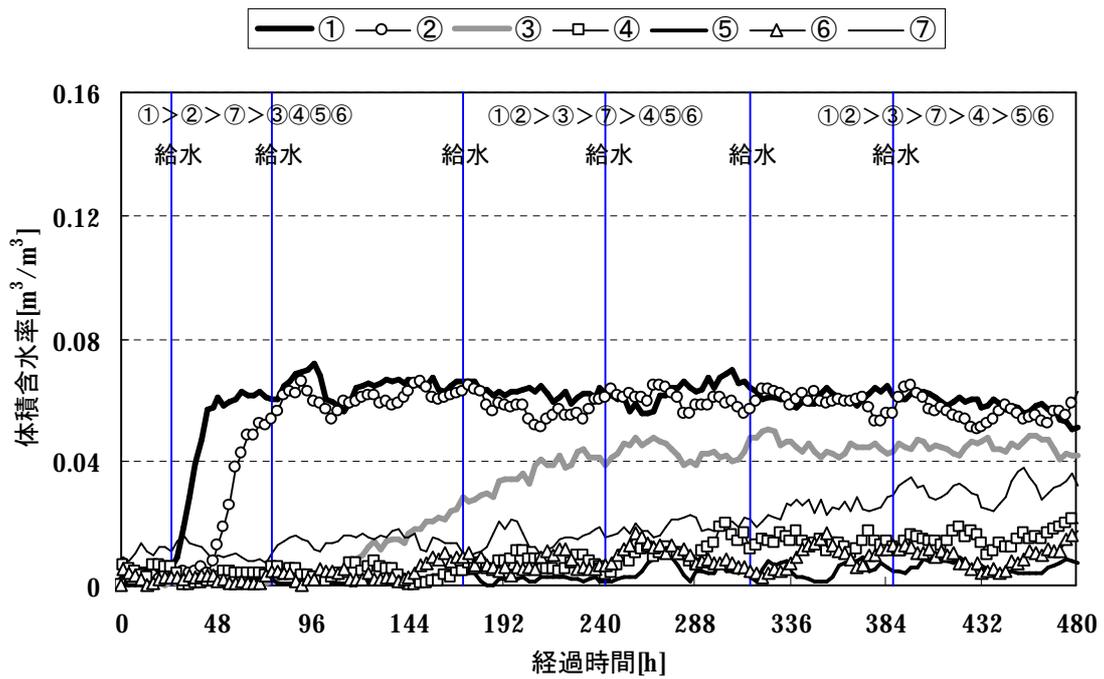
(k) $h=61\text{mm}$



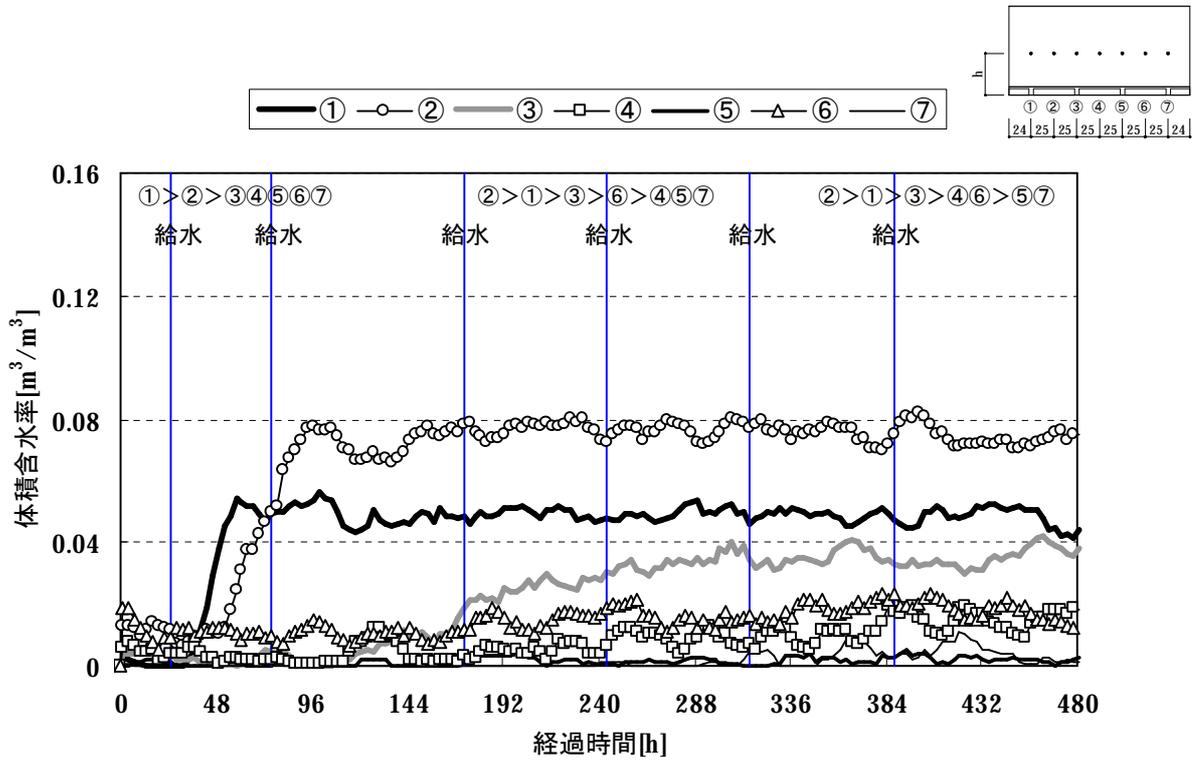
(l) $h=66\text{mm}$



(m) $h=71\text{mm}$

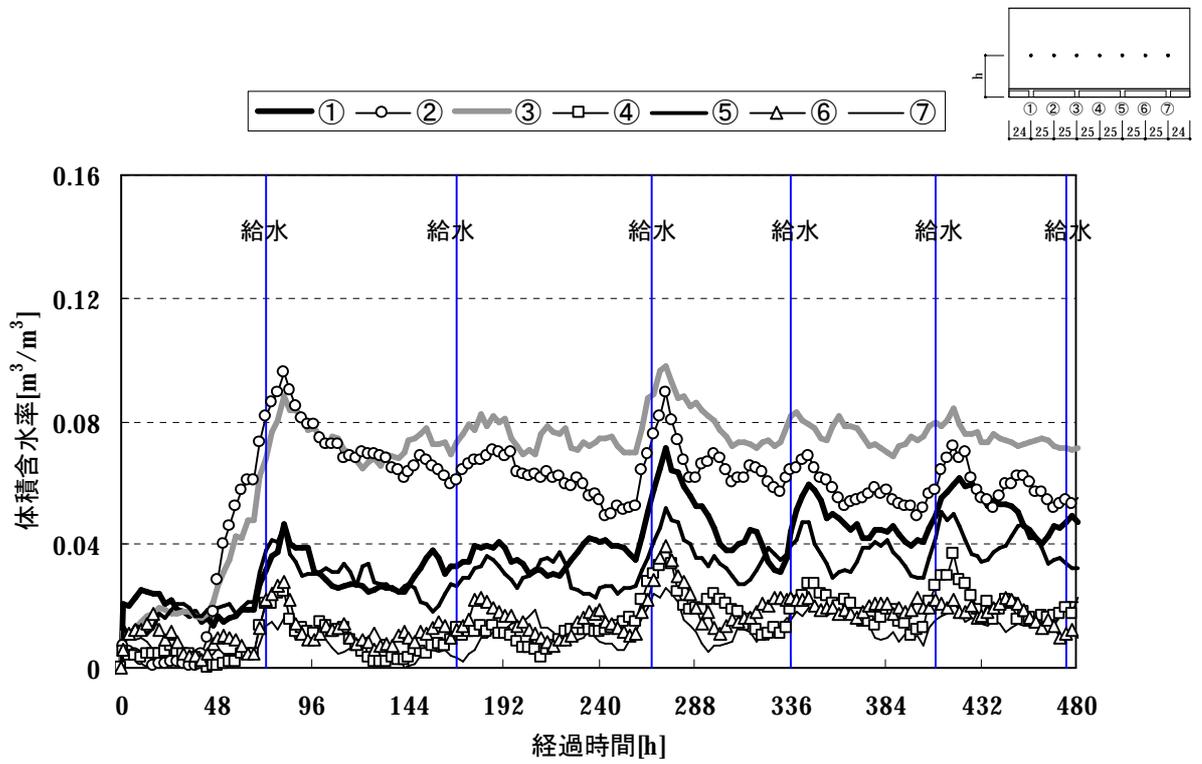


(n) $h=76\text{mm}$

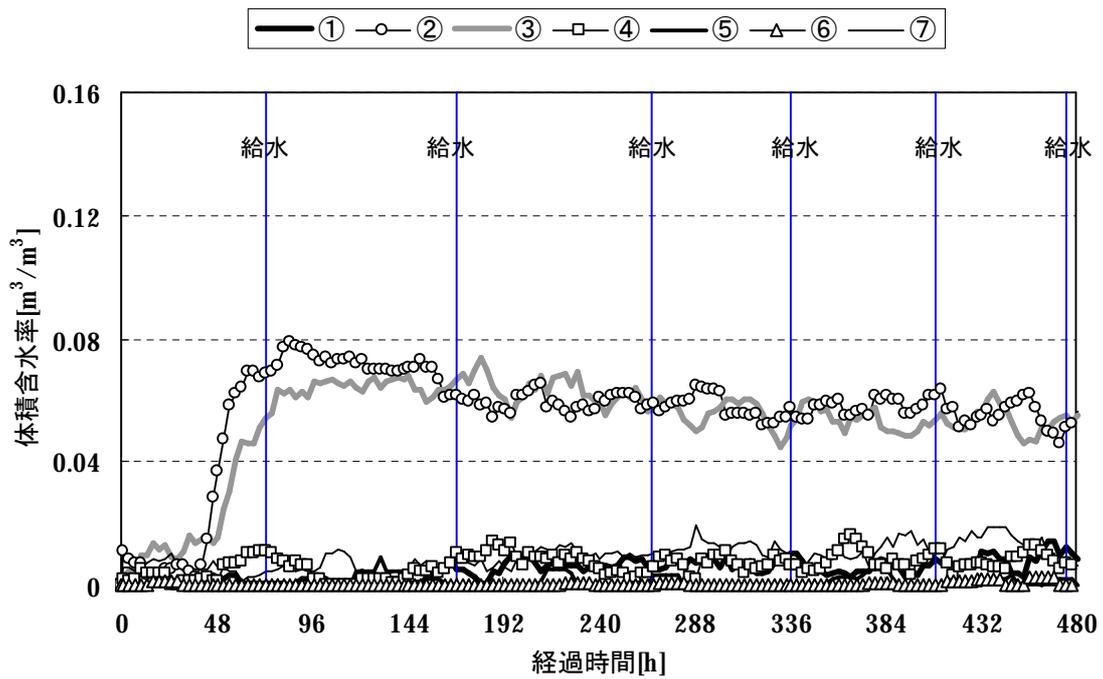


(○) $h=81\text{mm}$

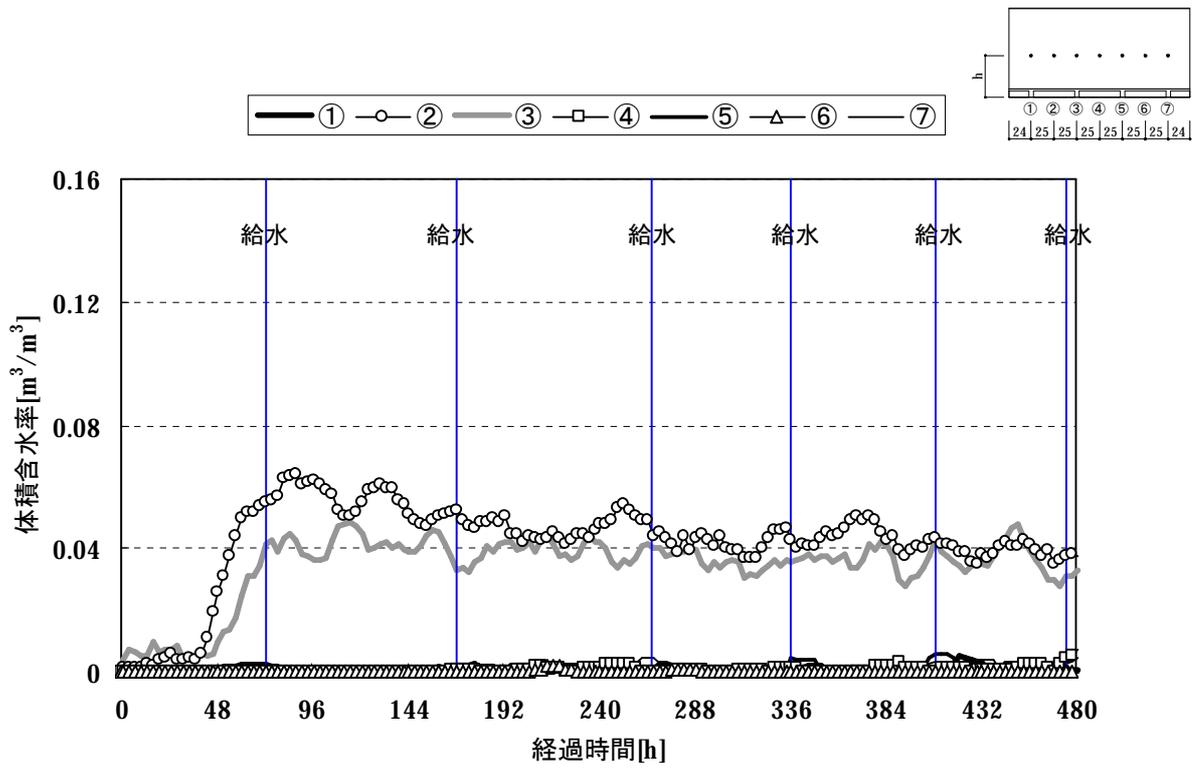
付録A-2 吸水実験の結果 試験体 No3 における体積含水率の経時変動



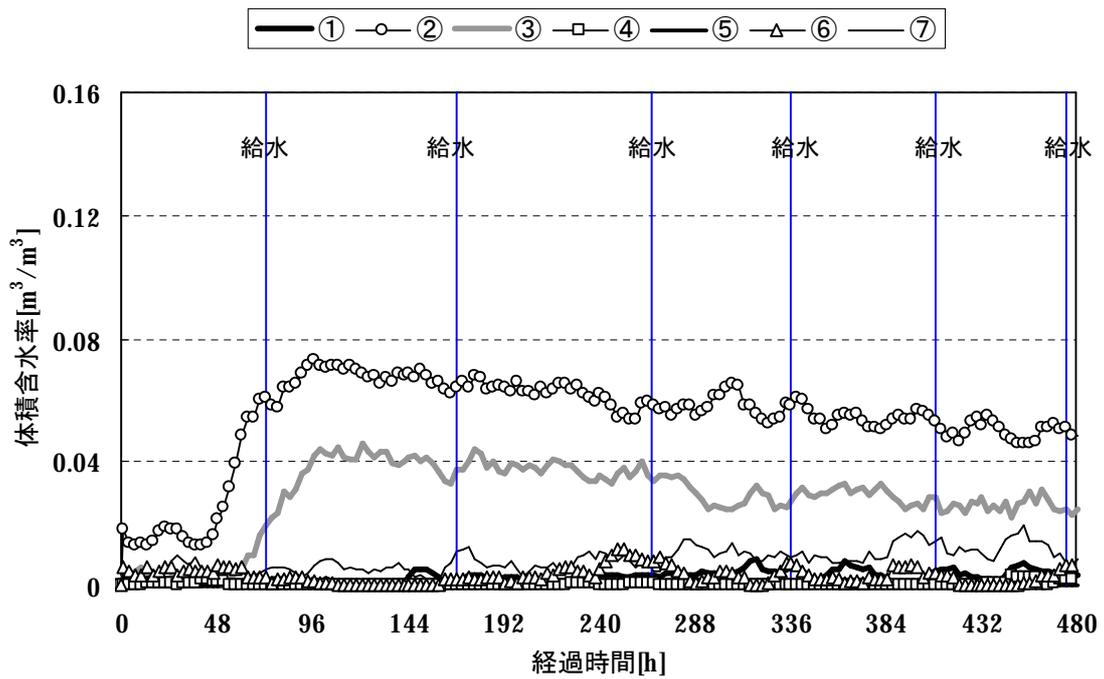
(a) $h=11\text{mm}$



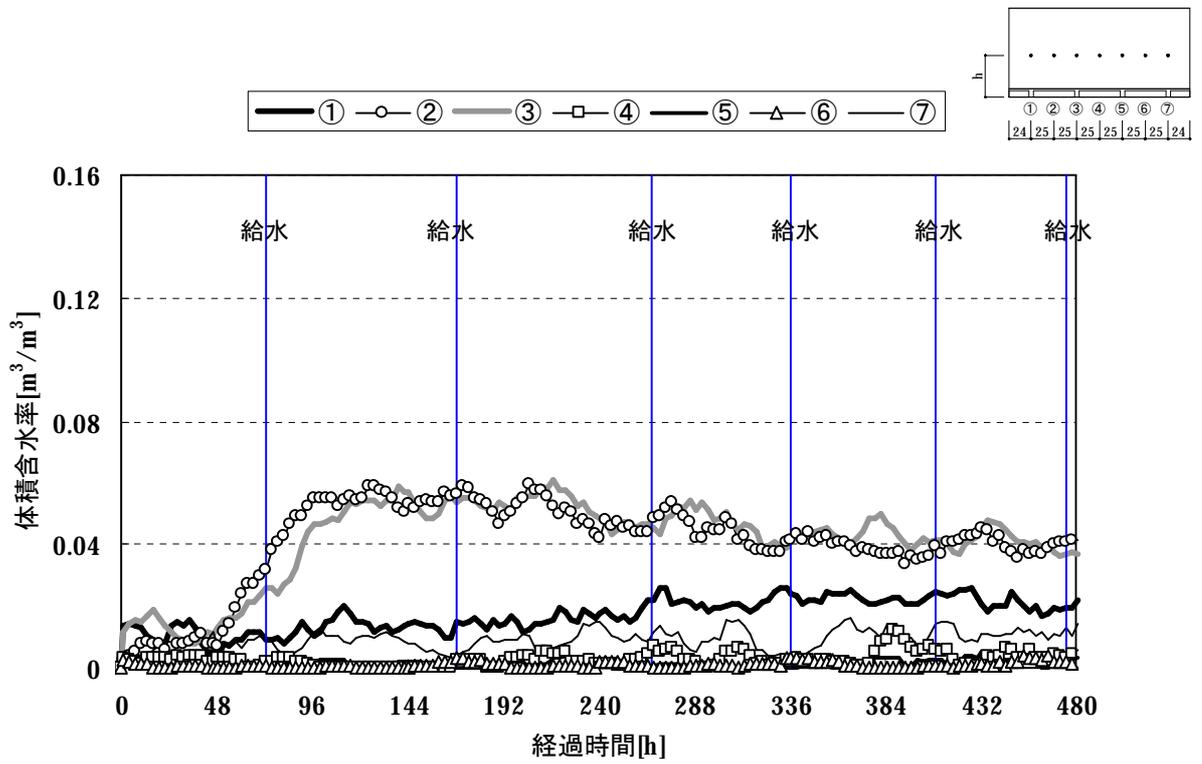
(b) $h=16\text{mm}$



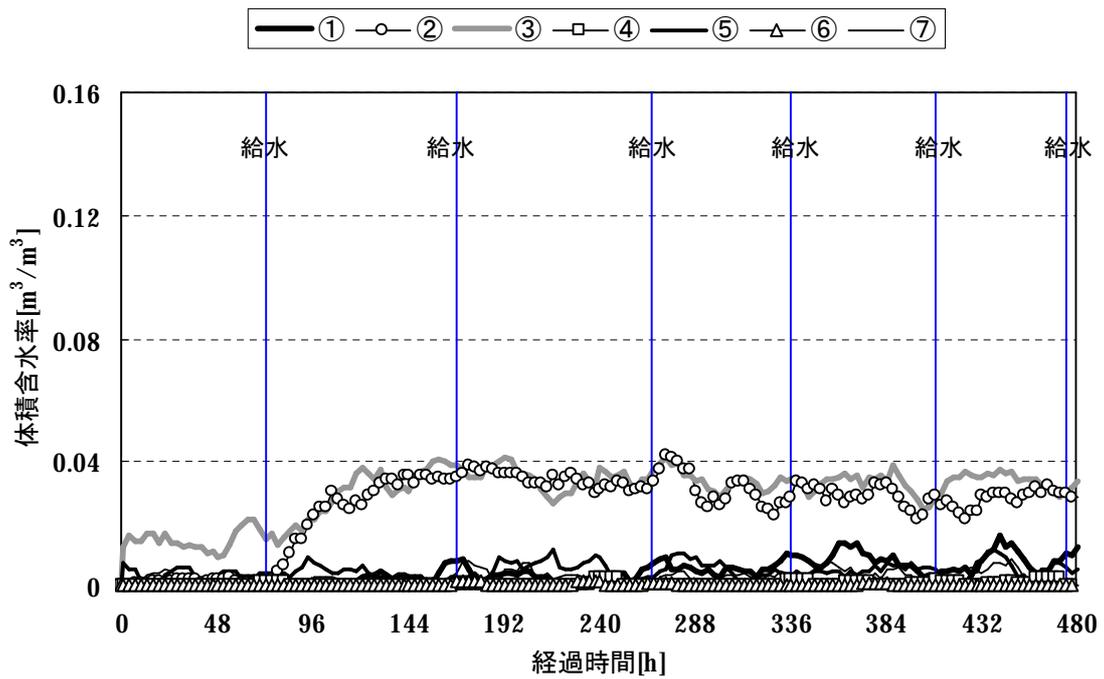
(c) $h=21\text{mm}$



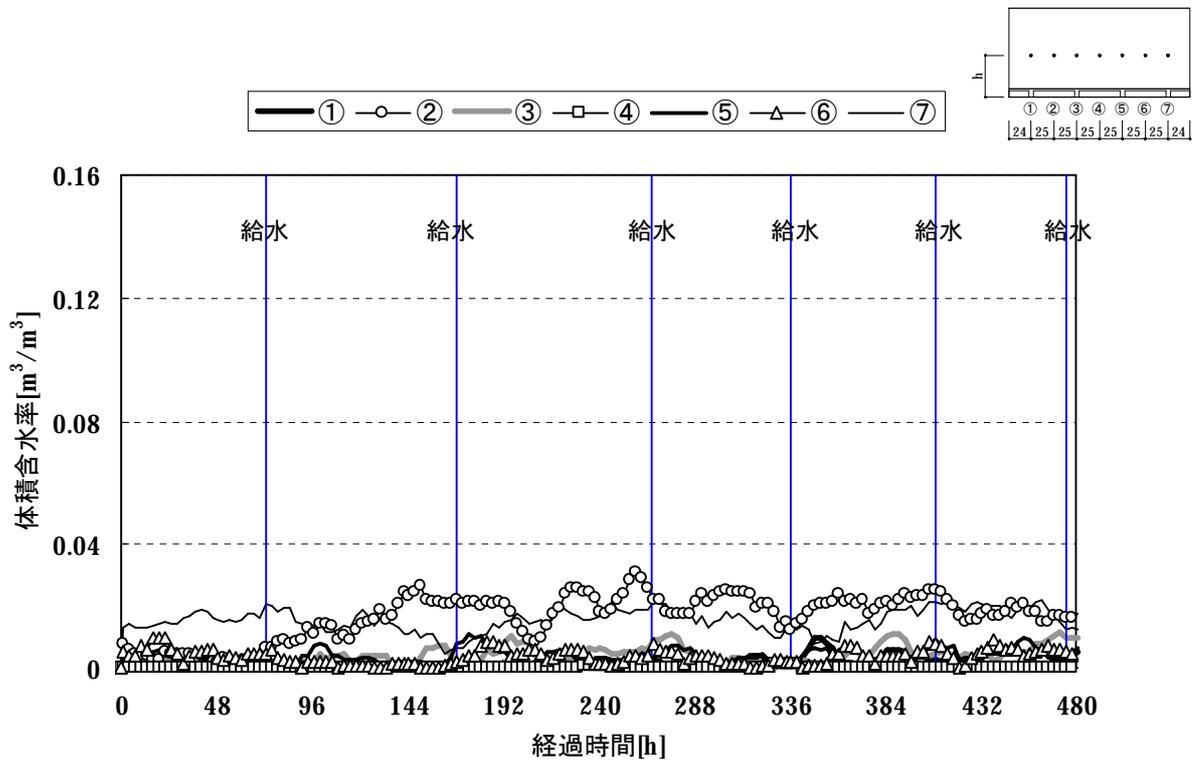
(d) $h=26\text{mm}$



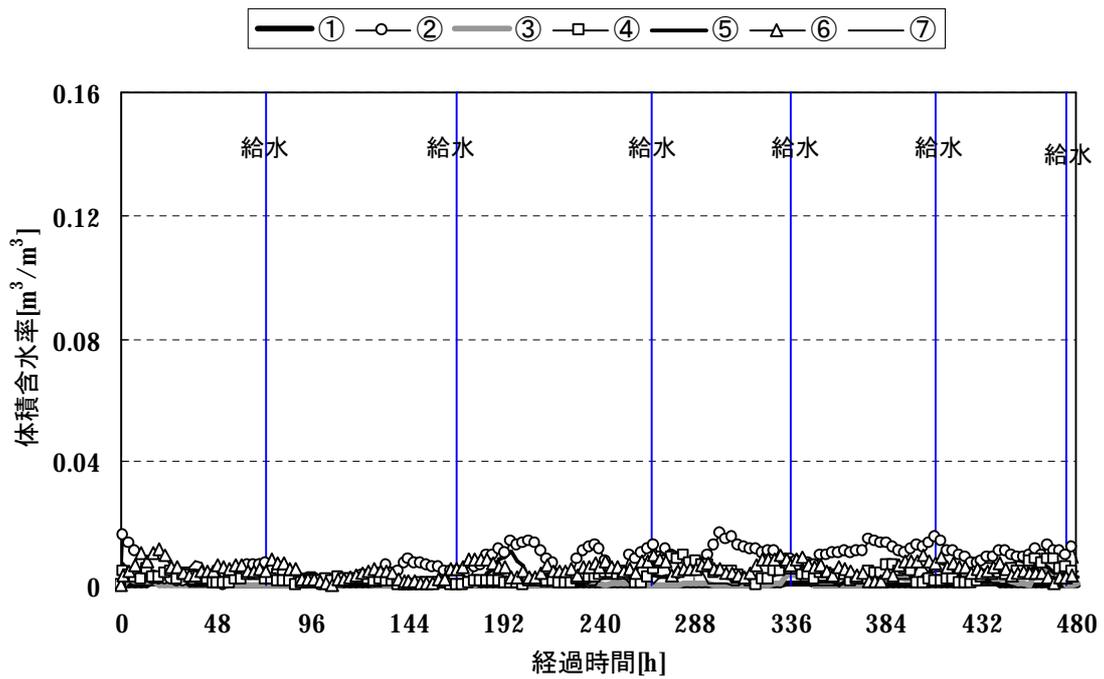
(e) $h=31\text{mm}$



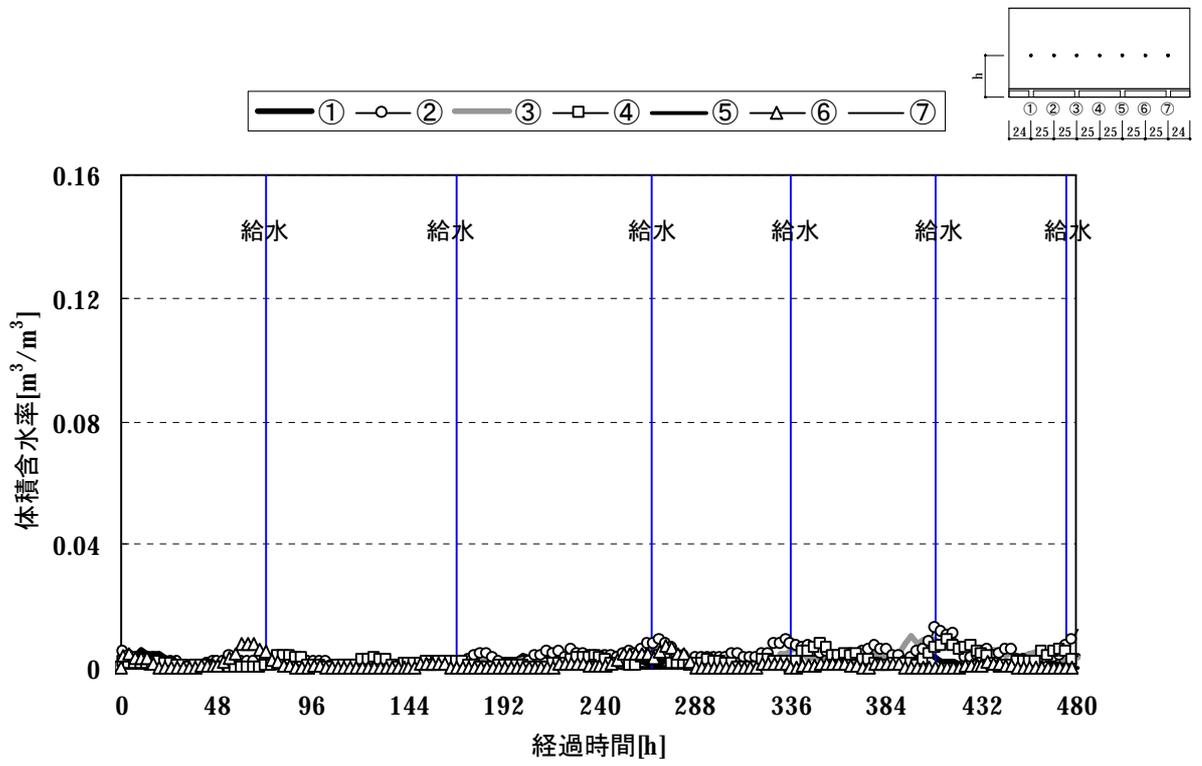
(f) $h=36\text{mm}$



(g) $h=41\text{mm}$



(h) $h=46\text{mm}$



(i) $h=51\text{mm}$

付録B 周辺雰囲気温度および相対湿度の変動が解析結果に及ぼす影響

本論で行った吸水実験の解析では周辺雰囲気温度および相対湿度（外界条件）に一定値を用いた。しかし、実際には温度で $\pm 3^{\circ}\text{C}$ 、相対湿度で $\pm 10\%$ 程度の変動が見られたので、ここで、その影響を検討する。

外界条件に一定値を用いた場合の含水率分布の計算結果と測定値を用いた場合の含水率分布の計算結果との比較を図B.1～図B.4に示す。両者の間にほとんど違いが見られず、本論で推察したとおり、周辺雰囲気温度および相対湿度の変動が解析結果に及ぼす影響は小さいと言える。

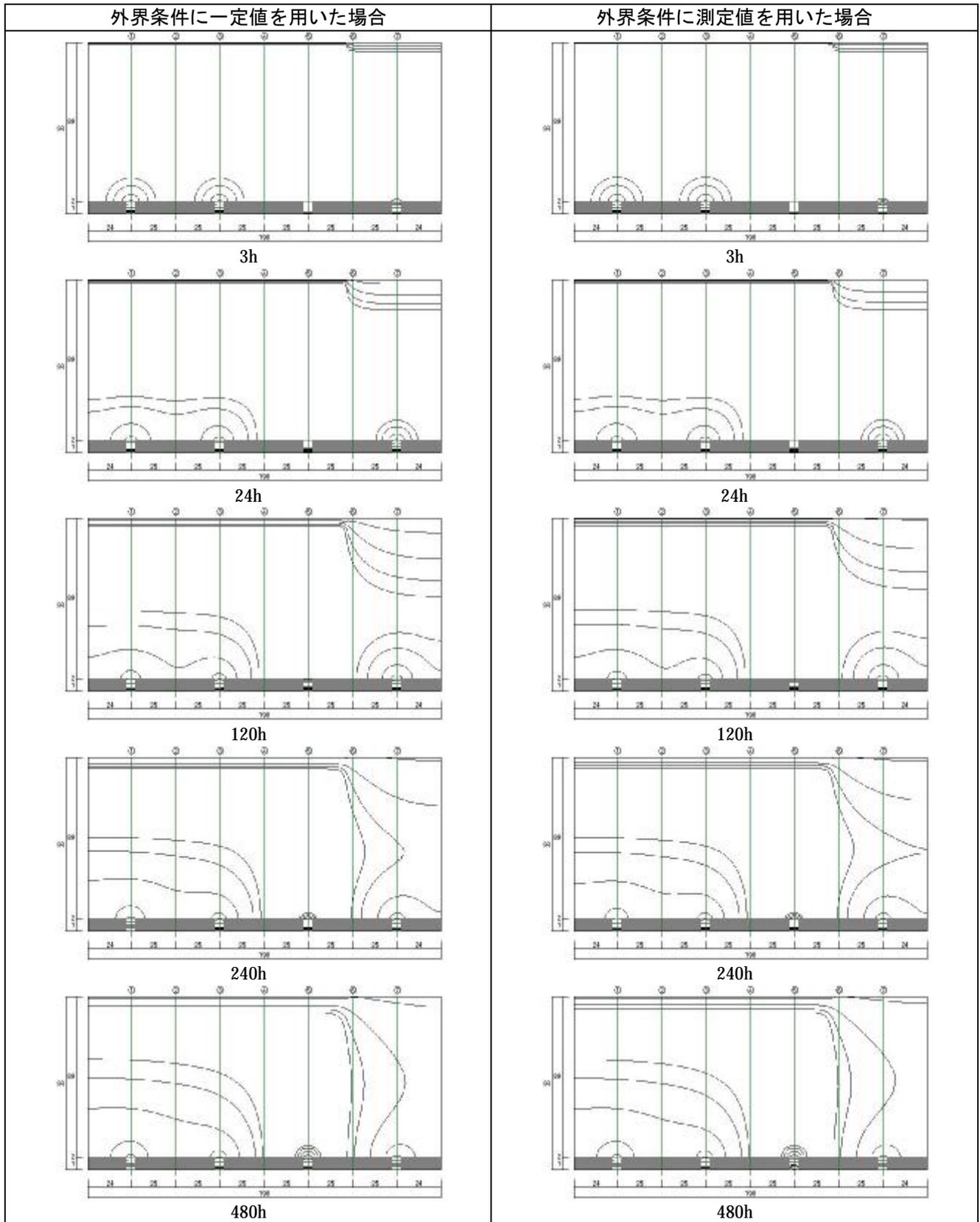
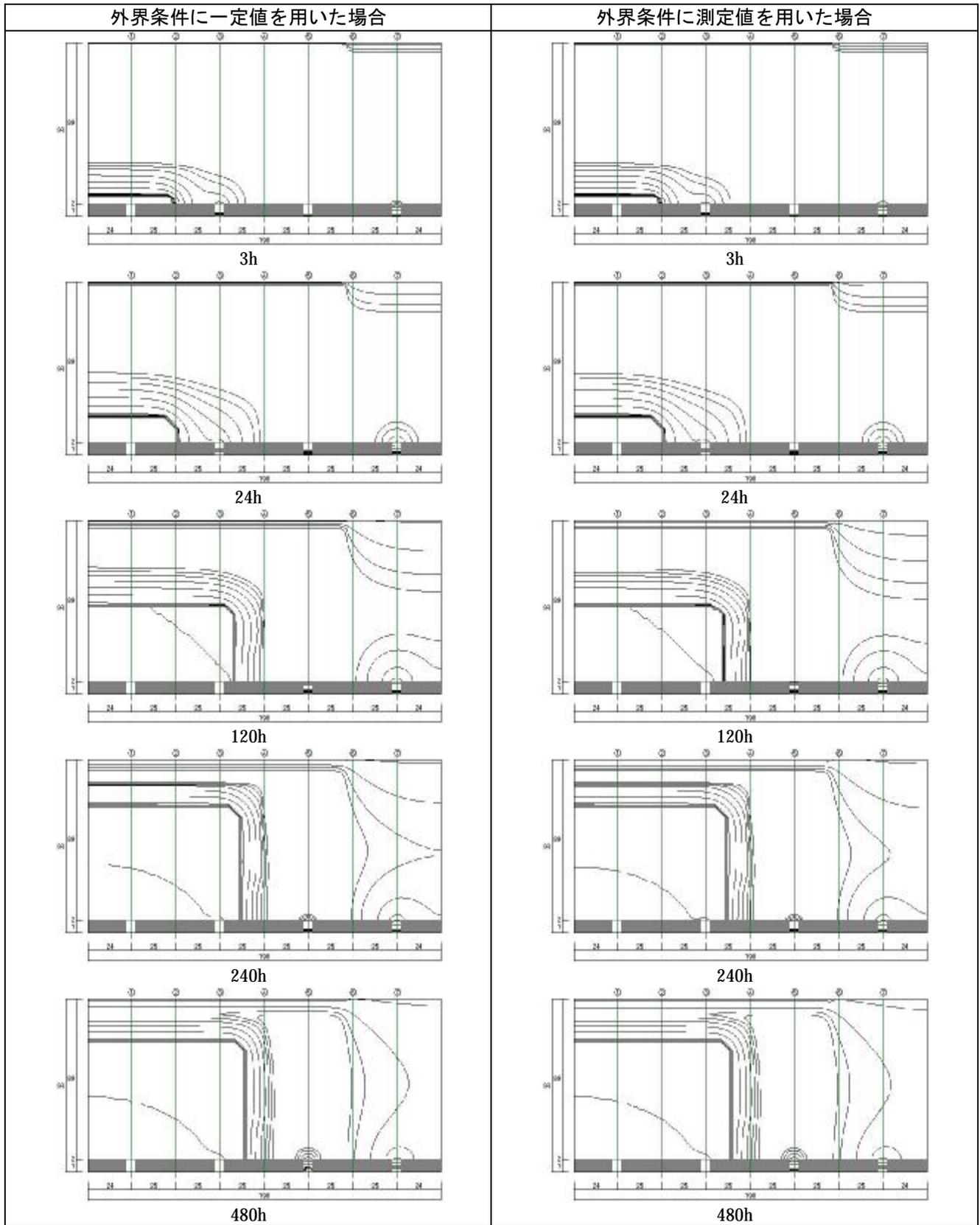
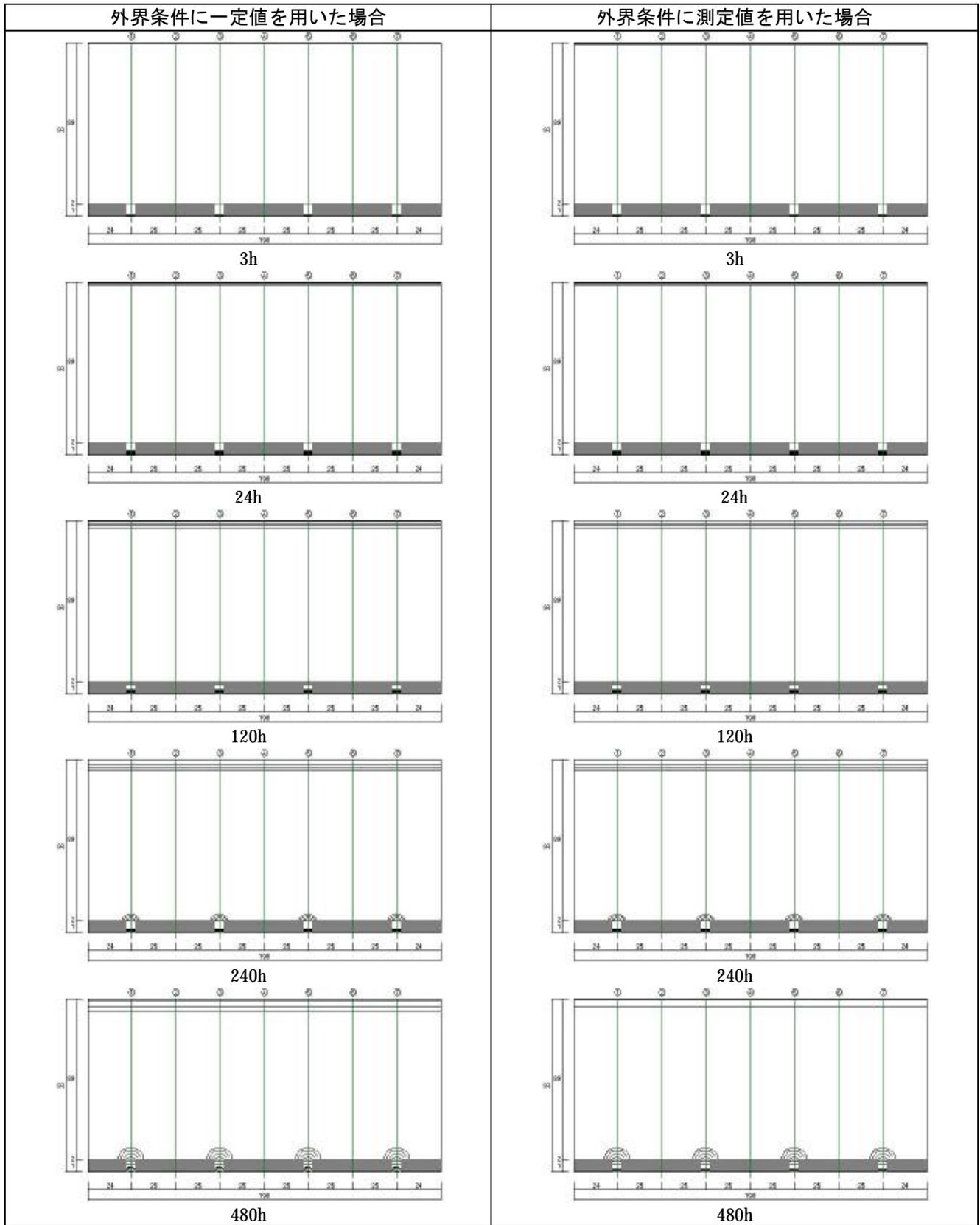


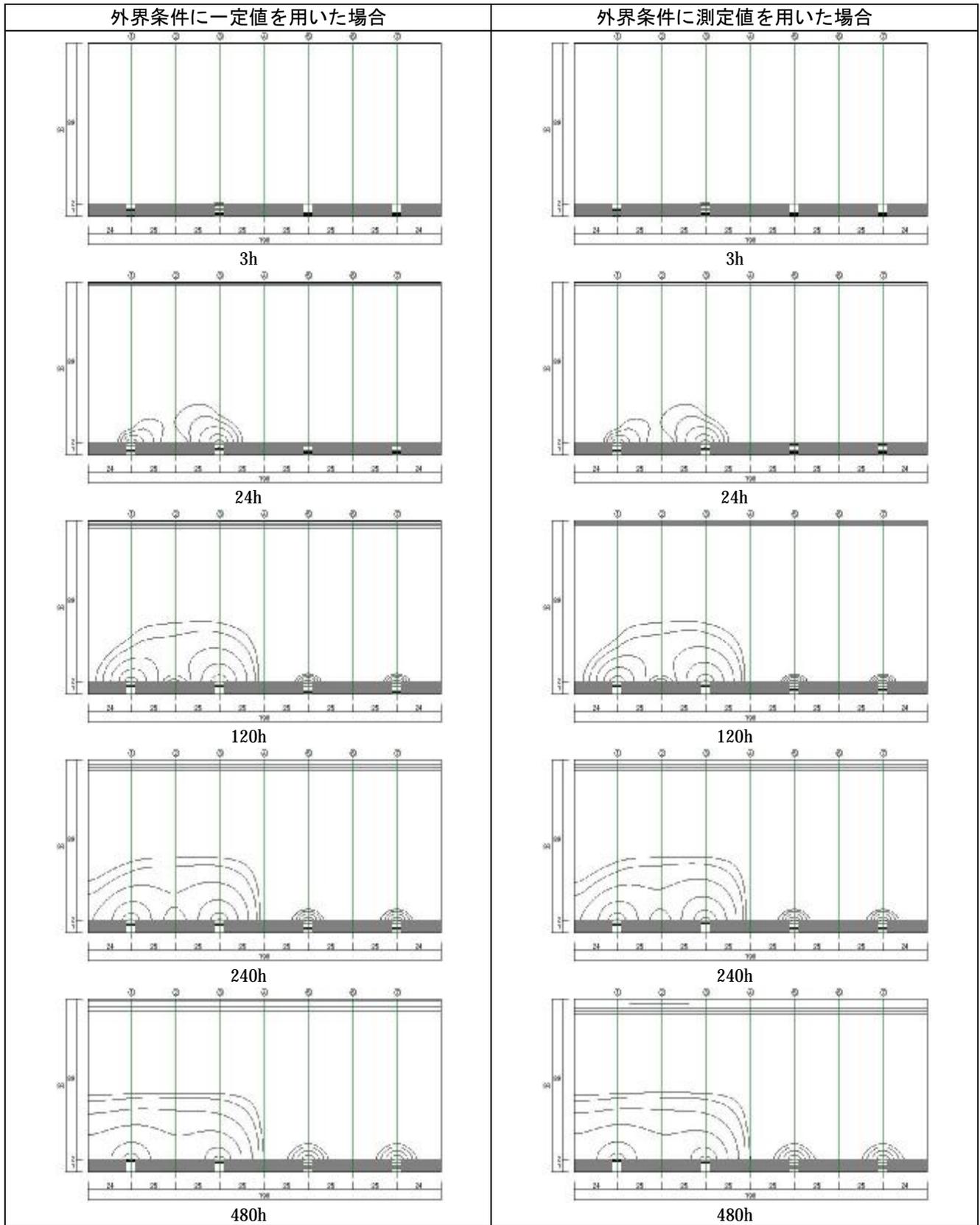
図 B.1 試験体 No1 (加熱の影響を考慮している)



図B.2 試験体 No1 (加熱の影響および浮きを考慮している)



図B.3 試験体 No2 (強度の違いや物性値のばらつきは考慮していない)



図B.4 試験体 No3 (加熱の影響を考慮している)

付録C 水分移動に関する物性値と骨材分布との関係

本論で用いたコンクリートの骨材の容積比率は、粗骨材の表乾密度 (2670kg/m^3 : 第3章の表 3.2 および第4章の表 4.1) と調合 (1m^3 当たり 909kg : 第3章の表 3.3 および第4章の表 4.2) から 34% 程度と推察され、面積比率も同程度と考えられる。

図 C.1 は、湿気伝導率測定 (第3章) に用いたコンクリート試験片における湿気伝導率測定値と骨材の面積比率との関係を示している。計測の結果、面積比率は 31.9% (平均) で、ばらつきは 21% ~46% であった。また、湿気伝導率測定値と骨材の面積比率の間には弱い相関が見られた (骨材の面積比率が小さい、すなわち骨材が少ないほど湿気伝導率大きい)。

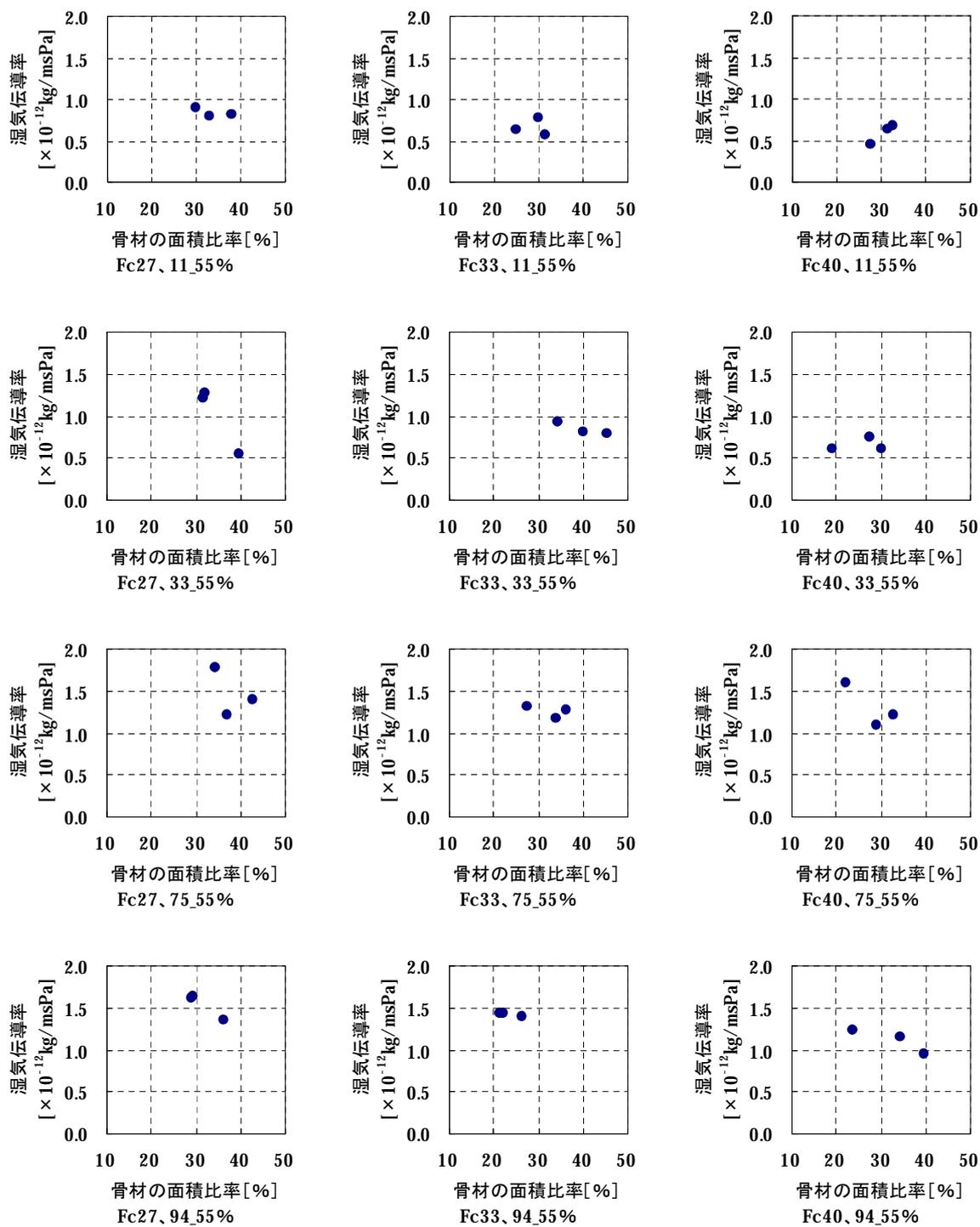
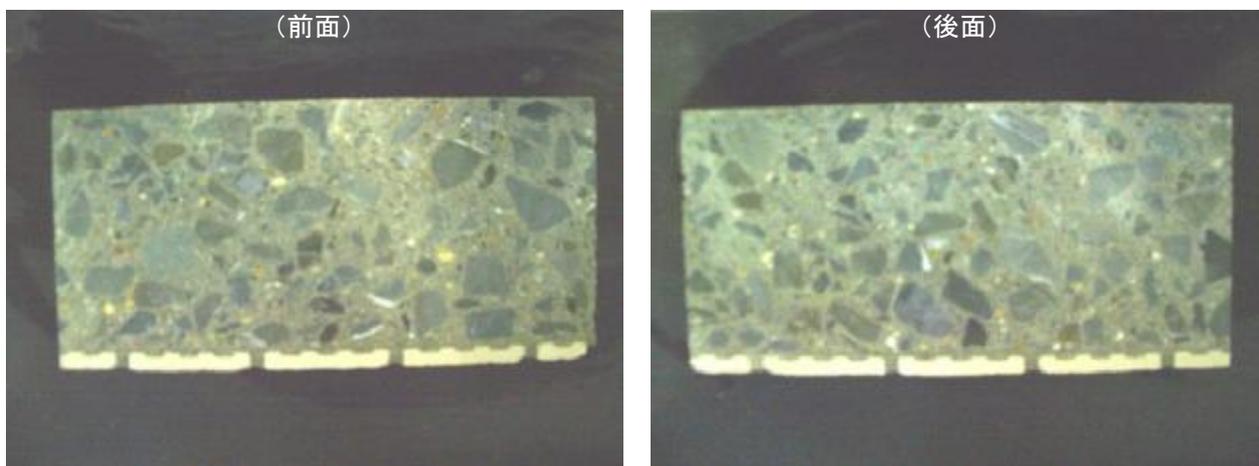


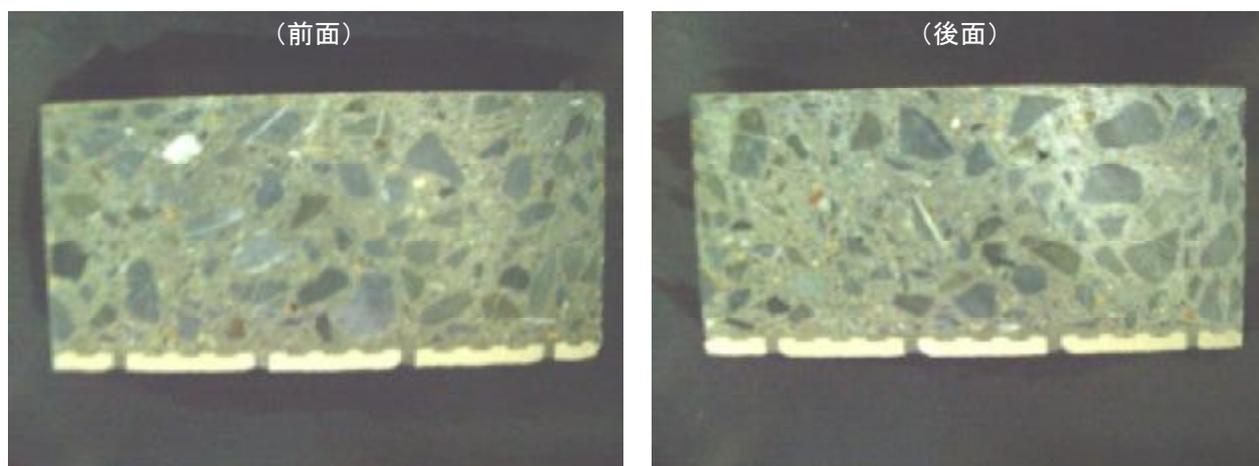
図 C.1 湿気伝導率測定値と骨材の面積比率との関係

※11_55 はピーカー内飽和塩水溶液が平衡する相対湿度 11%、恒温・恒湿槽の相対湿度 55%を意味する。

吸水実験（第4章）に用いた試験体 No1 と試験体 No2 における切断面（広面）を図 C.2 に示す。この図から、骨材は均等に分布しているように見える。しかし、図 C.3 に示すように試験体を縦横に区切り、各位置について面積比率を算定すると、表 C.1 に示すように、全体の面積比率は 34.5% と容積比率に近い値であるが、部位ごとに見ると、端部よりも中央の方が大きい、上部よりも下部（タイル面側）の方が大きい等、骨材分布にばらつきが見られる。このばらつきが水分の移動性状に影響を及ぼす要因の一つと考えられるが（その他にセメントペースト内の空隙の量や径が関係してくる）、今回の吸水実験（試験体 No2）では、その影響が顕著に現れなかった。その理由として、コンクリートの場合は移動係数が極めて小さく吸水量が少ないこと、移動係数と骨材の面積比率との相関はそれほど大きくないこと（前述）、等が考えられる。



(a) 試験体 No1



(b) 試験体 No2

図 C.2 試験体の切断面の様子

1 (中央) 2 3 4 (端部)

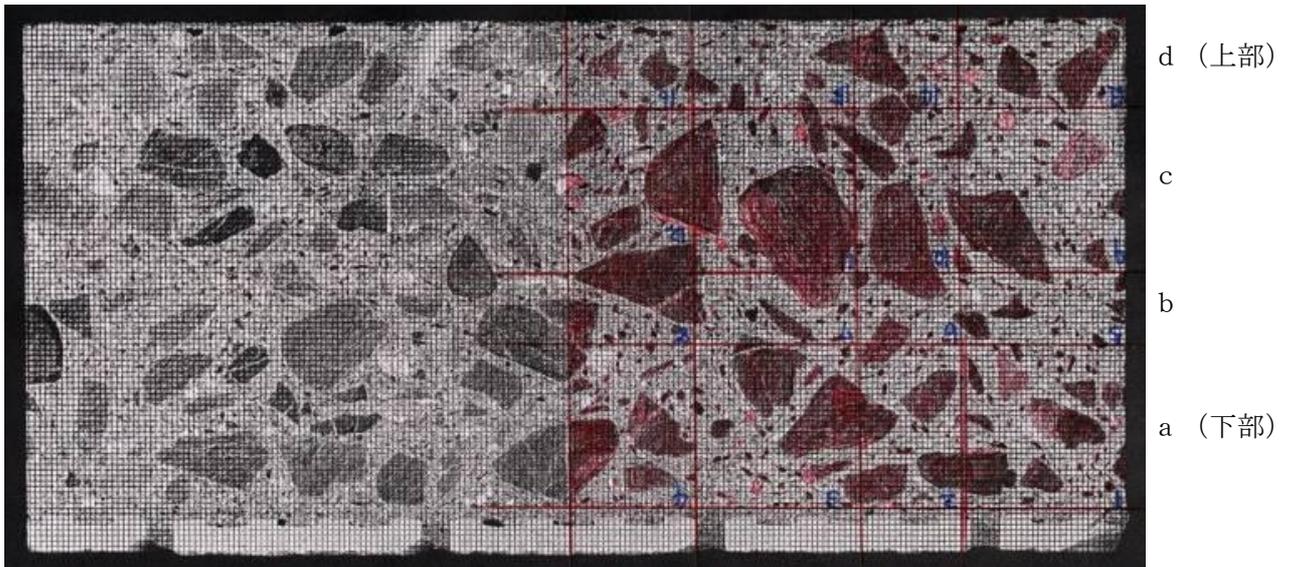


図 C.3 骨材の面積比率の算定方法

表 C.1 骨材の面積比率の算定結果

	1	2	3	4	計
d	62 (368) 16.8%	73 (460) 15.9%	99 (304) 32.6%	159 (480) 33.1%	393 (1632) 24.1%
c	328 (690) 47.5%	400 (900) 44.4%	256 (570) 44.9%	275 (900) 30.6%	1259 (3060) 41.1%
b	162 (299) 54.2%	97 (390) 24.9%	83 (247) 33.6%	65 (390) 16.7%	407 (1326) 30.7%
a	242 (690) 35.1%	331 (900) 36.8%	224 (570) 39.3%	278 (900) 30.9%	1075 (3060) 35.1%
計	794 (2047) 38.8	901 (2670) 33.7%	662 (1691) 39.1%	777 (2670) 29.1%	3134 (9078) 34.5%

※1のdで62(368)16.8%は、62が骨材の占める面積、368が全面積、16.8%が骨材の面積比率を表す

引用文献

- [1] 「外壁仕上げ剥落防止対策の現状と提案」、日本仕上学会編、1991
- [2] Philip, J. R. and De Vries, D. A. : Moisture Movement in Porous Materials under Temperature Gradient, Trans. Ameri. Geoph. Union, Vol.38, pp.222-232, 1957
- [3] Luikov, A. V. : Transporterscheinungen in Kapillar-porösen Körpern, Akademie Verlag, 1958
- [4] Luikov, A. V. and Mikhailov, Yu. A. : Theory of Energy and Mass Transfer, Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1961
- [5] Prigogine, I. : Introduction to Thermodynamics of Irreversible Process, Springfield, Thomas, 1955
- [6] De Groot, S. R. and Mazur, P. : Non-equilibrium Thermodynamics, North Holland, Amsterdam, 1962
- [7] Krischer, O. : Die Wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungs Technik, 2 Auf., Springer V., 1963
- [8] Cary, J. W. and Taylor, S. A. : The Interaction of Simultaneous Diffusions of Heat and Water Vapour, Soil Sci. Soc. Amer. Proc., Vol.26, pp.413-416, 1962
- [9] Cary, J. W. : Onsager's Relation and Non-isothermal Diffusion of Water Vapour, J. Phy. Chem., Vol.67, pp.126-129, 1963
- [10] Cary, J. W. and Taylor, S. A. : An Evaporation Experiment and its Irreversible Thermodynamics, Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol. 7, pp.531-538, 1964
- [11] Cary, J. W. and Taylor, S. A. : Linear Equation in Porous Material under Temperature Gradient, Soil Sci. Soc. Amer. Proc., Vol.28, pp.167-171, 1964
- [12] 松本 : 建築壁体における熱・水分の同時移動および水分蓄積に関する研究、博士論文、1978
- [13] 松本 : 気液同時移動の場合の熱水分の移動方程式、日本建築学会近畿支部研究報告集、計画系、pp.17-20、1974
- [14] 松本 : 結露蒸発のある壁体の熱水分移動の方程式とそれによる結露過程の計算、日本建築学会環境工学第6回熱シンポジウム、湿気、6、pp.15-27、1976

- [15] 松本、前田：結露蒸発の生じない場合の壁の吸放湿の基礎式について、空気調和・衛生工学会近畿支部環境工学委員会資料 11、pp.1～11、1967
- [16] 池田：結露障害防止に関する基礎研究、博士論文、1979
- [17] 斎藤、関根、宮路：日本建築学会論文報告集、No.57、1957.7
- [18] 斎藤、関根、桑原：日本建築学会論文報告集、No.59、1958.6
- [19] Johansson, C. and Persson, G. : Byggmästaren, Bd. 17, Haft 311, 1946
- [20] 松本、銚井、平田：壁体材料及び地盤の水分拡散係数の測定と測定法の検討、日本建築学会大会学術講演梗概集（関東）、計画系、Vol. 59、pp.731～732、1984.10
- [21] 松本、銚井、山本：含水率勾配に応じる水分拡散係数の測定に関する研究 重力の影響の検討、日本建築学会大会学術講演梗概集（東海）、D環境工学、pp.889～890、1985.10
- [22] 松本、銚井、河尻：建築材料の水分特性に関する研究 漆喰の含水率勾配に対する拡散係数 D_w の測定、日本建築学会大会学術講演梗概集（北海道）、D環境工学、pp.1041～1042、1986.8
- [23] 恩村、松本、銚井：建築材料の水分拡散特性の測定に関する研究—木材の水分拡散係数の測定、日本建築学会大会学術講演梗概集（北陸）、D環境工学、pp.943～944、1987.8
- [24] 銚井：湿った建築壁体の熱的特性に関する基礎的研究、博士論文、1986
- [25] 重松、松本、小椋：吸水性壁体における雨水蒸発冷却効果、日本建築学会大会学術講演梗概集（関東）、D環境工学、pp.1247～1248、1993.9
- [26] Onmura., S., Matsumoto, M. and Hokoi, S. : Study on evaporative cooling effect of roof lawn garden, Energy and Buildings Vol.33, pp.653-666, 2001
- [27] 銚井、伊庭：建築壁体における凍結・融解過程に関する研究 (2) 雨水が与える影響、日本建築学会大会学術講演梗概集（東北）、D-2 環境工学Ⅱ、pp.277～278、2000.9
- [28] 岸本、銚井：コンクリート壁体の熱水分移動に及ぼすひび割れの影響、日本建築学会大会学術講演梗概集（中国）、D-2 環境工学Ⅱ、pp.311～312、1999.9
- [29] 岸本、銚井：コンクリート壁体への水分及び拡散物質の流入に及ぼす表面ひび割れの影響、日本建築学会大会学術講演梗概集（東北）、D-2 環境工学Ⅱ、pp.355～356、2000.9
- [30] 椎名、大藪：構造体コンクリートの部材中心部小空間における湿度の長期変化、第 42 回

- セメント技術大会、1988.5
- [31] 谷沢、松本：RC集合住宅の内断熱壁体の各部の温・湿度変動の長期測定調査ーコンクリート初期含水の影響ー、日本建築学会大会学術講演梗概集(九州)、計画系、pp.1397～1398、1989.10
- [32] 谷沢、松本、椎名：RC造集合住宅外壁の含水率変動に関する長期測定調査（その1）、日本建築学会大会学術講演梗概集（東北）、D環境工学、pp.807～808、1991.9
- [33] 谷沢、松本、椎名：RC造集合住宅外壁の含水率変動に関する長期測定調査（その2）、日本建築学会大会学術講演梗概集（北陸）、D環境工学、pp.949～950、1992.8
- [34] 橋田、田中、小池：打設直後からの乾燥途中におけるコンクリートの含水状態 仕上げ材下地としてのコンクリートの含水状態の検討・その1、日本建築学会構造系論文報告集、第412号、pp.1～8、1990.6
- [35] 橋田、田中、小池：打設直後からの乾燥途中におけるコンクリートの含水状態 仕上げ材下地としてのコンクリートの含水状態の検討・その2、日本建築学会構造系論文報告集、第419号、pp.21～29、1991.1
- [36] 荒井、河合、寒河江、武廣、権藤、平井：美術館の温湿度・空気質環境計画に関する研究（その1）コンクリートの湿気・アルカリの放出特性、日本建築学会大会学術講演梗概集（北海道）、D-2環境工学Ⅱ、pp.301～302、1995.8
- [37] 寒河江、荒井、権藤、太田：コンクリート構造体の乾燥特性と室内環境、日本建築学会大会学術講演梗概集（近畿）、D-2環境工学Ⅱ、pp.251～252、1996.9
- [38] 荒井、寒河江、佐武、笠井、杓掛：コンクリート構造体の乾燥特性に関する研究 その1 含水率測定法の検討と現場への適用、日本建築学会大会学術講演梗概集（関東）、D-2環境工学Ⅱ、pp.289～290、2001.9
- [39] 松本、小椋：自然状態下における地下構造物とその周囲地盤の熱・湿気性状の解析、日本建築学会計画系論文報告集、第474号、pp.27～36、1995.8
- [40] 中嶋、小椋、松下：地下空間の結露問題に関する研究ーコンクリート施工時の高含水状態の影響ー、日本建築学会大会学術講演梗概集（関東）、D-2環境工学Ⅱ、pp.331～332、2001.9
- [41] Goran Hedenblad, Lund University Doctoral Dissertation, Moisture Permeability of Mature

- Concrete, Cement Mortar and Cement Paste, 1993
- [42] Dorokhov, I. N., Kafarov, V. V. and Nigmatulin, P. I. : J. Appl. Math. Mech., 39, 461, 1975
- [43] Luikov, A. V. : Int. J. Heat Mass Transfer 9, 139, 1966
- [44] Valchar, J. : Heat Transfer Vol. 1, pp.409, 1966
- [45] Matsumoto, M. : Energy Conservation in Heating Cooling Ventilating Building, Heat and Mass Transfer Technique, Vol. 1, pp.45 Hemisphere, 1978
- [46] Matsumoto, M. : Proc. 6th All Union Heat and Mass Transfer Conference, Minsk , Vol. 7, pp.39, 1980
- [47] Rosema, A. : Proc. Int. Seminar of Heat and Mass Transfer, pp.109, 1974
- [48] 「新建築学大系 10 環境物理」 2 熱および 3 湿気、彰国社、1984
- [49] パタンカー, S. V. 原著、水谷、香月共訳:「コンピュータによる熱移動の流れの数値解析」、森北出版、1985
- [50] 山田順治、有泉昌:「わかりやすいセメントとコンクリートの知識」、鹿島出版、1976
- [51] 荒井康夫:「セメントの材料化学」、大日本図書、1991
- [52] 松本衛、他:「新建築学大系 10 環境物理」 3 湿気、彰国社、pp.120~pp.121、1984
- [53] 小椋大輔: 地下構造物の熱・湿気性状に関する研究、博士論文、2000
- [54] 黒木勝一、藤本哲夫: 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 熱環境小委員会第 31 回熱シンポジウム 湿気研究の新たなる進展、pp.25~pp.32、2001
- [55] 「建築計画原論Ⅲ」、渡辺要、丸善、1978
- [56] Yoshihiko Kishimoto, Shuichi Hokoi, Kazunori Harada and Satoru Takada : The Effect of Vertical Distribution of Water Permeability on the Modeled Neutralization Process in Concrete Walls, Journal of ASTM International, Vol. 4, No. 1, JAI100323, Jan. 2007
- [57] S. Hokoi and M. Matsumoto : An Analysis of Stochastic Properties of Room Air Temperature and Heating Load - Influences of the Randomness of Parameters -, Proceedings of CLIMA 2000 '97, Paper No. 56, Aug. 1997
- [58] 「建築設計資料集成 1 環境」、日本建築学会編、丸善、1978
- [59] Laboratoire de Thermique des Matériaux et des Bâtiments, INSA, Toulouse France data, Beton

Siliceux

- [60] Fraunhofer Institute of Building Physics, Holzkirchen, Germany data
- [61] Galbraith, G. H. and McLean, R. C. 'Vapour permeability testing', Final report to the Building Research Establishment; Contract F3/2/490, Strathclyde University, June 1993
- [62] Kurt Kielsgaard Hansen, Sorption Isotherms, A Catalogue, The Technical University of Denmark, Technical Report 162/86
- [63] Catalogue of Material properties (upgraded version), Report Annex XIV, Page 2.2
- [64] 「コンクリート便覧 (第二版)」、日本コンクリート工学協会編、技報堂出版、pp.265、1996
原著は Beaureau of Reclamation : Concrete Manual 8thed., 1977
- [65] Laboratory of Building Physics, KU-Leuven, Belgium data
- [66] Norwegian Building Research Institute and Norwegian Institute of Technology, Trondheim, Norway data
- [67] Institute for Research in Construction Data
- [68] Kumaran, M. K., Bomberg, M. : A Gamma-Spectrometer for Determination of Density Distribution in Building Materials, Proceedings of the International Symposium on Moisture and Humidity, Washington, D. C., 1985
- [69] 岸本、銚井、高田 : コンクリート壁体の耐久性に及ぼす表面ひび割れの影響、平成 12 年度日本建築学会近畿支部研究報告集、pp.181~184、2000.6
- [70] 中山、渡辺、坪内、柿沢 : タイル張り層の温度変化による挙動と剥離進行の実験的検討 (その 1 : 実験概要と挙動測定結果)、日本建築学会大会学術講演梗概集 (北陸)、A 材料施工、pp.205~206、1992.8
- [71] 高田、川地、林、小川、三谷、甚野、難波 : 多機能 PCa 版に先付けされたタイルの剥離防止に関する研究 (その 2 熱冷繰り返し試験)、日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東)、A 材料施工、pp.463~464、1997.9
- [72] 名知、小野 : 外装タイル張り仕上げの剥離防止設計に関する研究 その 1 熱冷繰り返し試験装置の試作、日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東)、A 材料施工、pp.571~572、2001.9

※ [41]、[59]、[60]、[61]、[62]、[63]、[65]、[66]、[67] は「建築材料の熱・空気・湿気物性値、M. Kumar Kumaran 著、日本建築学会訳、丸善、2001」から抜粋した。なお、[59]、[60]、[62]、[63]、[65]、[66]、[67] の出版年は不明である。

記号

A : 試験片の面積 [m^2]

a : メスピペットの断面積 [m^2]

C_1 と C_2 : パラメータ (第5章)

$C'_1 \sim C'_4$ と $C''_1 \sim C''_4$: 定数 (第5章)

c : 定圧比熱 [J/kgK]

c_c : コンクリートの比熱 [J/kgK]

c_m : 湿り空気の定圧比熱 [J/kgK]

cr : 熱容量 [$\text{J/m}^3\text{K}$] ((2.18)式で定義)

D_{jk} ($j, k = 0, 1, 2, 3$) : 広義の伝導率

d : 試験片 (または試験体、試料) の厚さ [m]

$F()$: 関数を表す

F_w : 水分 1kg に作用する外力 [N/kg , J/mkg , m/s^2]

$f()$: 関数を表す

g : 重力加速度 [9.8m/s^2]

H : エンタルピー [J/kg]

I : 体積含水率 Y のときの試料の γ 線透過量 [cps]

I_0 : 乾燥時の試料の γ 線透過量 [cps]

J : 水分流 [$\text{kg/m}^2\text{s}$]

J_M : 単位時間あたりの水分の移動量 [m^3/s]

J_a : 乾燥空気流 [$\text{kg/m}^2\text{s}$]

J_g : 気相水分 (水蒸気) 流 [$\text{kg/m}^2\text{s}$]

J_1 : 液相水分 (毛管水、吸着水などの液水) 流 [$\text{kg/m}^2\text{s}$]

J_m : 湿り空気流 [$\text{kg/m}^2\text{s}$]

J_w : 水分流 [$\text{kg/m}^2\text{s}$]

K : 透水係数 [m/s]

k_p : 透気率 [kg/msPa]

k_v : 湿気伝導率 (見かけ上液相水分の移動を含む) [kg/msPa]

Le ($= (a/D)^{1-N}$, $N \cong 1/3$) : ルイス数 [-]

(a : 湿り空気の温度伝導率 [m²/s]、 D : 湿り空気中の水蒸気の拡散係数 [m²/s])

n : 固体表面の内向き法線ベクトルを表す

P : 気相の圧力 [N/m²]

p_v : 水蒸気圧 [Pa]

P_{vs} : 飽和水蒸気圧 [Pa]

q : 熱流 [W/m²]

q_c : 対流熱伝達による熱流 [W/m²]

q_r : 輻射熱伝達による熱流 [W/m²]

q' : 潜熱流 [W/m²]

Rh : 相対湿度 [-]

R_U : シリコンゴムの熱抵抗 [0.047m²K/W]

R_v ($= R/m_v$) : 水蒸気の理想気体定数 [461.643Pam³/kgK]

(R : 空気の気体定数 [8316.96Pam³/kmolK]、 m_v : 水蒸気の分子量 [18.016kg/kmol])

R' : ビーカー内空気の湿気抵抗 [m²sPa/kg]

r : 相変化熱 (気相から液相) [J/kg]

T : 温度 [K]

t : 時間 [s]

V : 試験片の体積 [m³]

V_w : 湿気平衡時の水分の体積 [m³]

v : メスピペット内を移動する水分の速度 [m/s]

W : 水蒸気から液水に相変化する水分量 [kg/m³s]

W_v : 重量変化 [g/h]

x : 位置 [m] (x方向)

y : 位置 [m] (y 方向)
 a : 総合熱伝達率 [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]
 a_c : 対流熱伝達率 [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]
 a_r : 輻射熱伝達率 [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]
 a' : 湿気伝達率 [$\text{kg}/\text{m}^2\text{sPa}$]
 a'_T : 温度勾配に関する水分伝達率 [$\text{kg}/\text{m}^2\text{sK}$]
 a'_m : 水分化学ポテンシャル勾配に関する水分伝達率 [$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}(\text{J}/\text{kg})$]
 b_w : 水の質量吸収係数 [m^2/kg],
 l : 熱伝導率 [W/mK]
 l' : 気相水分の湿気伝達率 [kg/msPa]
 l'_p : 圧力勾配に関する水分伝達率 [kg/msPa]
 l'_{pg} : 圧力勾配に関する気相水分伝達率 [kg/msPa]
 l'_{pl} : 圧力勾配に関する液相水分伝達率 [kg/msPa]
 l'_T : 温度勾配に関する水分伝達率 [kg/msK]
 l'_{Tg} : 温度勾配に関する気相水分伝達率 [kg/msK]
 l'_{Tl} : 温度勾配に関する液相水分伝達率 [kg/msK]
 l'_m : 水分化学ポテンシャル勾配に関する水分伝達率 [$\text{kg}/\text{ms}(\text{J}/\text{kg})$]
 l'_{mg} : 水分化学ポテンシャル勾配に関する気相水分伝達率 [$\text{kg}/\text{ms}(\text{J}/\text{kg})$]
 l'_{ml} : 水分化学ポテンシャル勾配に関する液相水分伝達率 [$\text{kg}/\text{ms}(\text{J}/\text{kg})$]
 m : 水分化学ポテンシャル (自由水基準) [J/kg]
 m_g : 気相水分の化学ポテンシャル (自由水基準) [J/kg]
 m_l : 液相水分の化学ポテンシャル (自由水基準) [J/kg]
 q_b : 湿気平衡時の試験片の重量 [kg]
 q_d : 105°C、24 時間乾燥させた後の試験片の重量 [kg]
 q_s : 30 日以上水中に浸漬した後の試験片の重量 [kg]
 q_t : 水中における試験片の見かけの重量 [kg]
 r : 密度 [kg/m^3]

r_c : コンクリートの密度 [kg/m³]

r_m : 湿り空気の密度 [kg/m³]

r_w : 水の密度 [1000.0kg/m³]

y : 体積含水率 [m³/m³]

Y_b : 平衡含水率 (=湿気平衡時の体積含水率) [m³/m³]

Φ : 空隙率 [-]

Ψ : 水頭 [m]

Δd : 試験片を厚さ方向に 10 分割したときの幅 [m]

Δp_v : 水蒸気圧差 [Pa]

ΔT : 温度差 [K]

Δt : 差分における時間刻み [s]

ΔW : 単位時間単位面積当たりの重量変化 [kg/m²s]

Δx : 差分における位置刻み [m]

Δy : 差分における位置刻み [m]

Δm : 試験片中央より Δd だけ上の位置での水分化学ポテンシャルと試験片中央より Δd だけ下の位置での水分化学ポテンシャルとの差 [J/kg]

$\Delta \Psi$: 水頭差 [m]

∇ : 空間勾配を表す微分演算子で $=i\partial/\partial x + j\partial/\partial y + k\partial/\partial z$ (i, j, k は x, y, z 方向の単位ベクトル)

添え字)

a : 乾燥空気

f : 材料表面

g : 水蒸気

i : 位置の x 座標番号

j : 位置の y 座標番号

k : 時間ステップ番号

l : 液水

out : 外気

s : 個体実質部

x : 流れの方向 (x 方向)

y : 流れの方向 (y 方向)

_bottom : 試験片下面

_center1 : 試験片中央より Δd だけ上の位置

_center2 : 試験片中央より Δd だけ下の位置

_in : ビーカー内空気

_out : ビーカー外空気

_top : 試験片上面

_ssws : 飽和塩水溶液と平衡するという意

※cps : 1 秒間当たりの計数 (counts per second)

本論文に関連する発表論文一覧

1. 審査付論文

[1.1] 恩村、銚井、松下、小椋、小南、安井：「強度の異なるコンクリートの熱湿気物性に関する研究 熱湿気物性の測定」、日本建築学会環境系論文集、第73巻第625号、pp.299～306、2008.3

[1.2] Sadayuki Onmura, Shuichi Hokoi, Takayuki Matsushita, Daisuke Ogura, Kazuya Kominami and Yoshitaka Yasui : 「A Measurement of Concrete Hygrothermal Properties and the Influence of its Scattering on Hygrothermal Behavior in Concrete Walls」、Second Symposium on Heat-Air-Moisture Transport: Measurement and Implications in Buildings, April 19-20, 2009, Vancouver, B. C. Canada (審査中)

[1.3] Sadayuki Onmura, Mamoru Matsumoto and Shuichi Hokoi : Study on evaporative cooling effect of roof lawn garden, Energy and Buildings 33, pp.653-666, 2001

2. 日本建築学会大会発表

[2.1] 恩村、松本、銚井：建築材料の水分拡散特性の測定に関する研究—木材の水分拡散係数の測定、日本建築学会大会学術講演梗概集（北陸）、D環境工学、pp.943～944、1987.8

[2.2] 恩村、松本、銚井、松下、小椋、小南、安井：「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（北海道）、pp.403～404、2004.8

[2.3] 安井、松本、銚井、松下、恩村、小椋、小南：「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（北海道）、pp.405～406、2004.8

[2.4] 恩村、銚井、松下、小椋、小南、安井：「鉄筋コンクリート壁の異なる位置における熱・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（近畿）、pp.379～380、2005.9

[2.5] 安井、銚井、松下、恩村、小椋、小南：「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3 透水係数の測定、気液分離法の提案」、日本建築学会大会学術講演梗概集（近畿）、pp.381～382、2005.9

[2.6] 恩村、銚井、松下、小椋、小南、安井：「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（関東）、pp.337～338、2006.9

[2.7] 安井、銚井、松下、恩村、小椋、小南：「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（関東）、pp.339～340、2006.9

[2.8] 恩村、銚井、松下、小椋、小南、安井：「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6 解析に用いた値が結果に及ぼす影響」、日本建築学会大会学術講演梗概集（九州）、pp.361～362、2007.8

[2.9] 恩村、銚井、小椋：「タイル張り仕上げのコンクリート壁体への水分浸透 その1 模型による吸水実験」、日本建築学会大会学術講演梗概集（中国）、pp.301～302、2008.9

3. 日本建築学会近畿支部研究論文発表会発表

[3.1] 恩村、松本、銚井、松下、小椋、小南、安井：「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1 平衡含水率の測定」、平成16年度日本建築学会近畿支部研究報告集、pp.325～328、2004.6

[3.2] 安井、松本、銚井、松下、恩村、小椋、小南：「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2 熱伝導率、湿気伝導率の測定」、平成16年度日本建築学会近畿支部研究報告集、pp.329～332、2004.6

[3.3] 恩村、銚井、松下、小椋、小南、安井：「鉄筋コンクリート壁の異なる場所における熱・湿気物性に関する研究 その1 平衡含水率の測定」、平成17年度日本建築学会近畿支部研究報告集、pp.357～360、2005.6

[3.4] 安井、銚井、松下、恩村、小椋、小南：「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3 透水係数の測定、気液分離法の提案」、平成17年度日本建築学会近畿支部

研究報告集、pp.285～288、2005.6

[3.5] 恩村、銚井、松下、小椋、小南、安井：「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」、平成18年度日本建築学会近畿支部研究報告集、pp.333～336、2006.6

[3.6] 安井、銚井、松下、恩村、小椋、小南：「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」、平成18年度日本建築学会近畿支部研究報告集、pp.337～340、2006.6

[3.7] 恩村、銚井、松下、小椋、小南、安井：「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6 解析に用いた値が結果に及ぼす影響」、平成19年度日本建築学会近畿支部研究報告集、pp.161～164、2007.6

[3.8] 恩村、銚井、小椋：「タイル張り仕上げのコンクリート壁体を模した吸水実験 その1 実験の概要と結果」、平成20年度日本建築学会近畿支部研究報告集、pp.225～228、2008.6

4. その他

[4.1] 恩村、松本、銚井、松下、小椋、小南、安井：「強度の異なるコンクリートの熱・湿気物性」、日本建築総合試験所「G B R C」第119号、pp.24～32、2005.1

謝辞

まず、2004年にご永眠された神戸大学名誉教授・大阪産業大学教授・松本衛博士のご冥福を心よりお祈りいたします。筆者が神戸大学の学部生として環境計画学科 En-4 講座に配属して以来、長きにわたり懇切なご指導とご教授、ご鞭撻を頂きました。ただ、本論を報告できなかつたことを残念に思います。

同じく神戸大学の学部生から今日に至るまで、研究に対する考え方、取り組み方の基礎をご指導いただくにとどまらず、環境工学や熱水分移動問題に対する幅広い考えを惜しみなくご教示頂いた京都大学教授・銚井修一博士に心より深く感謝の意を表します。銚井教授には本論の内容・構成を始め、研究の今後の展望等について惜しみないご指導を頂きました。厚く御礼申し上げます。

本論をまとめるにあたり、懇切なご指導、ご助言を頂きました京都大学教授・吉田治典博士、同・高橋大次博士に深く感謝いたします。

京都大学助教・小椋大輔博士、ダイキン工業株式会社（当時神戸大学大学院生）・安井義貴氏、財団法人日本建築総合試験所環境試験室室長代理・小南和也氏には物性値の測定を分担して頂きました。また、小椋助教には γ 線含水率測定装置の取り扱い等、吸水実験に関して多くのご指導とご助言を頂きました。深く感謝の意を表します。

機会あるごとに適切なお助言を頂いた近畿大学教授・池田哲朗博士、神戸大学教授・松下敬幸博士、大阪工業大学准教授・佐藤真奈美博士、近畿大学准教授・岩前篤博士、三重大学准教授・永井久也博士、神戸大学准教授・高田暁博士、積水ハウス株式会社・埴淵晴男博士に深く感謝いたします。

京都大学准教授・原田和典博士、同・技官・木内隆子氏をはじめとする当時の京都大学大学院工学研究科銚井・原田研究室の方々、および京都大学工学部 RI 実験棟の方々には、在学中に数々のご協力を頂きました。御礼申し上げます。

本研究にあたり、全面的なご支援を頂きました株式会社浅沼組社長・浅沼健一氏、同・執行役員技術本部技術研究所所長・福本昇氏に深く感謝の意を表します。株式会社浅沼組技術本部技術研究所の方々、特に建築研究グループ前GL・木村建治氏、同・現GL・石原誠一郎氏、同・立松和彦氏、同・高見錦一氏、同・山崎順二氏、同・塩濱圭治氏には多大なご協力と励ましを頂きました。厚く御礼申し上げます。