

論文 質量変化によるコンクリートの物質透過抵抗性の簡易評価

西尾 壮平^{*1}

要旨：コンクリートの物質透過抵抗性に関する各種の試験においては、コンクリートの含水状態を考慮する必要があり、供試体の含水状態を統一するために待機期間が生じることがある。このような待機期間に生じる質量変化を利用した物質透過抵抗性の簡易評価を試みた。1kg 規模のコンクリート供試体を作製直後に 40℃、15%RH 環境下で 29 日間強制的に乾燥させた後、20℃、60%RH 環境下で吸湿させた際の質量変化を比較した結果、強制乾燥後の吸湿量は、材齢約 1.5 年で取得した表層透気係数と相関が見られることがわかった。また、配合条件やセメント種の影響を考察し、吸湿に寄与する空隙の存在が示唆された。

キーワード：物質透過抵抗性、質量変化、乾燥、吸湿、高炉セメント B 種、表層透気試験

1. はじめに

コンクリートの物質透過抵抗性を評価することを目的として表層透気試験のような非破壊試験を実施する場合、測定結果は含水状態の影響を強く受ける。そのため、各種試験方法の適用時期は、含水状態が平衡状態に到達した時期とするのが理想である。コンクリートは表面からの水分逸散により材齢の経過に伴って乾燥していくが、水分逸散は緩慢であるため試験の適用には一般に数箇月などの待機期間が生じる。そこで、供試体の含水状態を統一するための待機期間に着目し、作製直後の各種コンクリート供試体について、供試体の強制的な乾燥と吸湿による質量変化に基づいて取得できる簡易な指標により物質透過抵抗性の評価を試みた。乾燥条件として、温度はセメント硬化体への過大な影響を避けること、また国内の気候条件で到達する外気温を想定して 40℃とし、湿度は使用した設備の条件により 15%RH とした。29 日間の強制乾燥を行った後、20℃、60%RH の環境下で吸湿させた。乾燥および吸湿過程における質量変化と供試体の作製条件等を比較するとともに、材齢約 1.5 年で取得した表層透気係数との関係を調べ、物質透過抵抗性に関する考察を行った。

2. 実験の概要

2.1 供試体

(1) 作製条件

表-1 に供試体の作製条件を示す。供試体は高さ 100mm、幅 95mm、奥行 45mm の四角柱で、質量約 1kg

である。材料の条件としてセメント種を普通ポルトランドセメント(N)と高炉セメント B 種(BB)の 2 種類、水結合材比(W/B)を 0.4、0.5、0.6 の 3 段階とし、合計 6 水準の配合を設定した。脱型時期を打込みの 1 日後、7 日後の 2 水準、脱型後の材齢 28 日までの養生条件を 4 種類とし、脱型時期と養生条件の組み合わせを合計 8 水準設定した。養生条件の 4 種類の表記と詳細は、水：20℃標準水中養生、気：20℃、60%RH の気中養生、外：風雨を避けた屋外曝露、封：ポリ塩化ビニリデンラップで供試体を密封して気中養生環境内に静置、とした。以上のような材料、脱型時期、養生の設定により、供試体の種類は 48 種類、同条件で 2 体を作製した。また、100×95×45mm の供試体作製と同時に、材齢 28 日圧縮強度を測定するための円柱供試体（直径 100mm、高さ 200mm）を作製した。以下、上記の作製条件に基づいて供試体名を「N40-1 水」のように、配合名（セメント種と W/B の％表記）－脱型日（1 もしくは 7）と養生種別の略記（水、気、外、封の 4 種）で表記する。

(2) 配合、フレッシュ性状、材齢 28 日強度

表-2 に作製したコンクリートの配合、フレッシュ性状、材齢 28 日圧縮強度を示す。粗骨材最大径は 20mm とした。6 水準の配合の特徴は、コンクリート内部での物質移動経路の多くがセメントペーストと骨材との界面で生じることを想定し、異なる配合間で経路の量的な差が生じないように、単位細骨材量と単位粗骨材量を統一した点である。同様の理由により、空気量は 6 水準の配合でいずれも 4.5%を目標とした。ここで、セメント種 N、

表-1 供試体の作製条件

セメント種	W/B	脱型時期	養生（材齢 28 日まで）	作製数量
2 種類	3 段階	2 水準	4 種類（水、気、外、封と表記）	96 体（48 種類・各 2 体）
N：普通ポルトランドセメント BB：高炉セメント B 種	40% 50% 60%	1 日（24 時間）後 7 日後	水：標準水中養生 気：20℃、60%RH 環境での気中養生 外：屋根ありの屋外曝露 封：ラップ養生、20℃、60%RH 環境	供試体名の例：N40-1 水 セメント種(N)と W/B の％表記(40)－脱型時期(1 日)と養生種別（水中養生）

^{*1} （公財）鉄道総合技術研究所 材料技術研究部 コンクリート材料研究室 主任研究員 工博（正会員）

表－2 使用したコンクリートの配合とフレッシュ性状および材齢 28 日圧縮強度の試験結果

セメント種	W/B	細骨材率	スランプ (cm)	空気量 (%)	28 日強度 (MPa)	単位量(kg/m ³)						AE 減水剤	AE 助剤
						水	セメント	細骨材	粗骨材 1	粗骨材 2			
N	0.4	0.43	7.0	3.4	52.2	155	388	766	420	630		1.358	0.0097
	0.5		12.8	4.4	38.1	170	340					0.000	0.0102
	0.6		19.7	3.7	30.3	182	304					0.000	0.0091
BB	0.4		6.8	3.0	46.6	152	381					1.334	0.0114
	0.5		9.1	4.3	34.5	167	335					0.000	0.0101
	0.6		17.5	4.7	26.8	179	299					0.000	0.0090

注：28 日圧縮強度測定用試料は、脱型時期 1 日、標準水中養生とした。

W/B=0.4 ではスランプ 8cm を目標として混和剤の使用量を設定し、W/B=0.5, 0.6 ではスランプの調整をせず空気量の調製を優先した。そのため、スランプは W/B に応じて大きくなった。

2.2 測定項目

(1) 作製直後の強制乾燥による質量変化

供試体の強制乾燥条件は、40℃、15%RH とした。供試体は材齢 28 日までの養生の完了直後に起点となる質量を計測したのち、速やかに乾燥雰囲気試験室内に静置した。供試体の底面は、高さ約 20mm の面木に載せて浮かせた状態とした。質量の測定は、乾燥開始からの日数で 1, 2, 3, 6, 9, 13, 29 日後の 7 回実施した。なお、各条件 2 体の供試体で質量変化はおおむね一致したことから、質量変化は 2 体の平均を用いて算出した。

(2) 強制乾燥後の吸湿による質量変化

強制乾燥後の供試体を強制乾燥時よりも湿潤条件と考えられる 20℃、60%RH の試験室内に移設して吸湿させた。底面は強制乾燥時と同様に面木で浮かせた状態とした。質量の測定は、供試体の移設時を起点とし、15, 26, 34, 58, 91 日後の 5 回実施した。質量変化はここでも 2 体の供試体の平均とした。

(3) 表層透気係数および表面含水率

供試体を引き続き 20℃、60%RH の試験室内で保管し、材齢約 1.5 年で表層透気試験を実施した。表層透気係数の測定にはダブルチャンバー方式の機器を使用した。測定面は試験用ダブルチャンバーが設置可能な、供試体の 100×95mm の 2 面 (A 面, B 面) とし、各面の中心付近で 1 回測定した。同一の供試体に対する連続的な測定の影響に関して、コンクリート内部の圧力変化の影響を避けるため、同一箇所での測定間隔を 15 分以上とすることが提案されている¹⁾。ここでは影響を可能な限り排除するため A 面と B 面の測定時期に約 1 箇月の間隔を設けた。表層透気試験で想定される透気領域に対して今回の供試体規模は小さいと考えられるが、既往の研究²⁾で厚さ 30mm 以上では表層透気係数がほぼ一定となることが報告されているほか、供試体間の相対比較において支障はないと判断し、表面被覆などによる透気領域の制限は実施していない。供試体の含水状態を把握することを目的として、A 面の測定の直前に供試体の質量を測定した。また、A 面と B 面の各面について、表層透気試験の

直前に高周波容量式の機器で表面含水率を測定した。

3. 実験の結果および考察

3.1 作製直後の強制乾燥による質量変化

(1) 養生条件の影響

図－1 に強制乾燥時の質量変化を材齢 28 日までの養生条件で比較した例を示す。全体として、乾燥期間 29 日間での質量変化率は 1%～6%程度であり、乾燥 13 日後の時点で質量変化がほぼ認められなかったケースが見られたが、その一方で乾燥 29 日後の時点で質量の減少傾向が継続しているケースが見られた。ここで、図－1 に示した質量変化の累積値、すなわち乾燥による質量の減少量は、主に乾燥開始時点での供試体の水分含有量を示すものと仮定して、全供試体の測定結果に基づく知見および考察を以下に述べる。

W/B と脱型条件が同じ場合、養生条件により水分含有量が異なり、すべてのケースにおいて供試体の水分含有量が少ない順に、気中養生<屋外曝露<密封養生<水中養生となった。また、すべてのケースで気中養生と屋外曝露の質量変化曲線は類似し、屋外曝露供試体の水分含有量がやや多い結果となった。本試験において屋外曝露期間中の平均気温が約 9℃、平均相対湿度が約 77%、降雨は合計 7 日で 39mm と記録されている。このような環境下で本試験のように風雨を避けて屋外暴露した場合、20℃、60%RH の気中養生と比較してわずかに保有水分量が多くなることが確認された。以下、紙面の都合上、屋外曝露の結果を一部省略するが、気中養生と屋外曝露の結果等はほぼ同等と見なしてよい。

W/B が高い場合、7 日脱型よりも 1 日脱型のケースで養生条件の違いによる水分含有量の差が大きくなる傾向が見られた。図－1(b), (c)に示すように、W/B が 0.5, 0.6 と高く、1 日脱型で気中養生とした供試体においては、13 日以降の質量変化がほとんど見られなくなった。したがって、これらの供試体では乾燥開始時の水分含有量が少なかったため、40℃、15%RH 環境では 13 日間で平衡状態に達したものと考えられる。

(2) 水結合材比と脱型時期の影響

図－2 に W/B と脱型時期が質量変化に及ぼす影響を比較した例を示す。図－2(a)に示すように、水中養生では W/B の差が明確に見られ、W/B が低いほど水分含有量が

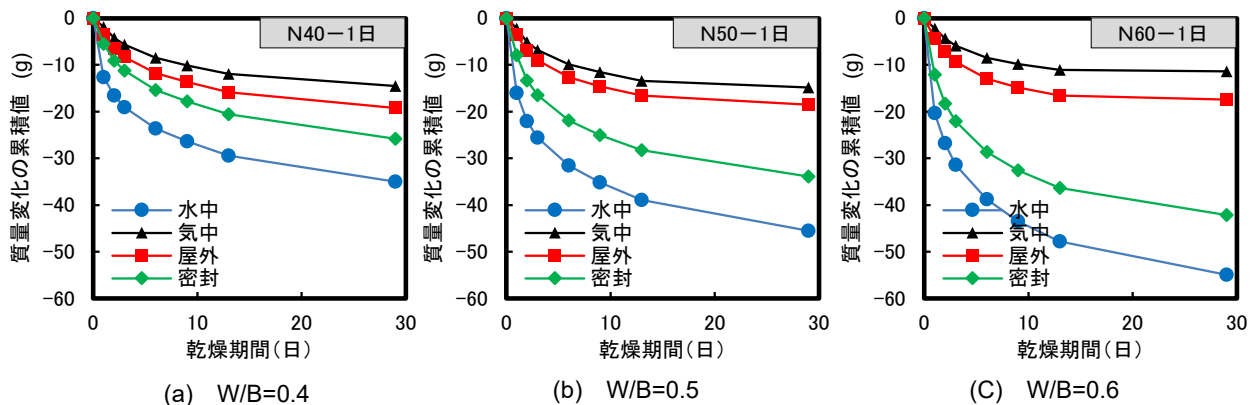


図-1 乾燥時の質量変化の例（養生条件の比較，N セメント，1 日脱型シリーズ）

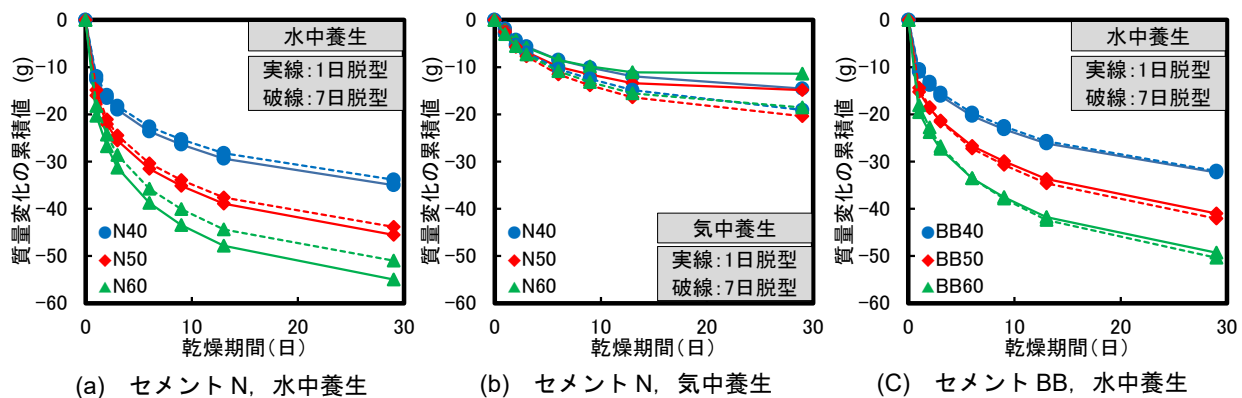


図-2 乾燥時の質量変化の例（脱型時期と W/B の比較）

少なくなった。紙面の都合で省略するが密封養生も同様であった。それに対して，図-2(b)に示すように気中養生では W/B による差が小さかった。W/B が高いほど供試体の脱型直後における水分含有量は多いと考えられるため，気中養生における W/B による差は，材齢 28 日までの養生期間中における乾燥によって小さくなったものと推察される。

気中養生では，図-2(b)に示すように早期脱型とした 1 日脱型の場合に水分含有量が少なくなった。養生時の環境が脱型前よりも乾燥雰囲気である場合，早期脱型であるほど供試体は乾燥雰囲気に早い段階から曝される形となるため，1 日脱型のケースで供試体の水分がより早く減少すると考えられる。そのため，これは妥当な結果と考えられる。一方で，図-2(c)に示すように，セメント種 BB で水中養生の場合，脱型時期による差が見られなかった。つまり，1 日脱型＋養生 27 日と 7 日脱型＋養生 21 日で養生完了後の水分含有量が同等となった。セメント種 BB では，型枠の存置による影響と，水中養生の影響は，水分量の観点で考えた場合は同等であることが示唆される。なお，ここでは記載を省略したがセメント種 BB で密封養生の場合も同じ傾向が見られた。

脱型時期の影響に関して，セメント種が N で水中養生の場合では，図-2(a)に例示したように 1 日脱型よりも 7 日脱型で水分含有量が少なくなった。これは，セメン

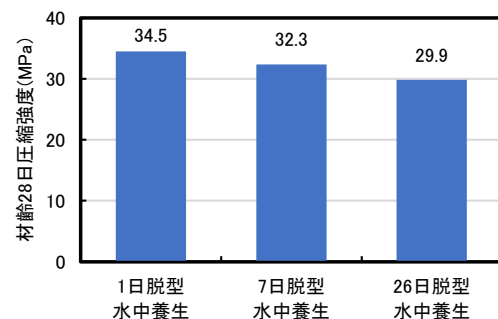


図-3 脱型時期が水中養生後の強度に及ぼす影響

ト種が N の場合，脱型時期が早期であるほど水中養生による水分の浸透量が多く，養生完了時点で保有する水分量が多くなるためと推測される。図-3 は，本研究とは別途で検証した，脱型時期の異なる水中養生後の材齢 28 日圧縮強度試験の結果である。これは，セメント種 N，呼び強度 24 MPa のレディーミクストコンクリートの円柱供試体により，脱型時期を 1 日・7 日・26 日の 3 水準とし，脱型後の養生条件を標準水中養生とした場合の 28 日圧縮強度を比較したものである。早期脱型であるほど高い圧縮強度を示す傾向が見られた。このことから，セメント種が N で材齢 28 日までの水中養生を行った場合，早期脱型であるほど水中養生期間が長くなるため，養生効果が高く，養生完了時点での水分含有量が多くなり，圧縮強度が高くなることがわかる。なお，セメント種が

BB の場合は脱型時期による差が見られなかったため、セメント種 N と BB では、水中養生がセメント硬化組織の形成に及ぼす影響や、水中養生時の水分浸透などのメカニズムが異なることが示唆される。

3.2 強制乾燥後の吸湿による質量変化

(1) 養生条件の影響

図-4 に強制乾燥後の吸湿による質量変化を材齢 28 日までの養生条件で比較した例を示す。すべての供試体において質量は増加したため、40℃、15%RH で 29 日間の乾燥は、20℃、60%RH の環境における平衡状態よりも過剰な乾燥条件であったことが確認された。全体として、91 日間での吸湿による質量増加率は 0.3%~0.8% 程度であった。吸湿量は 26 日後の測定時点で急激に低下し、今回の吸湿条件においては、吸湿開始から 4 週間程度の期間に顕著な質量変化を生じることが確認された。W/B が低く、水中養生を行ったケースでは 57 日以降の質量変化がほぼ見られなくなったが、その一方で 91 日後の時点で質量の増加傾向が継続しているケースが見られた。全供試体の測定結果に基づく知見および考察を以下に述べる。なお、3.1 節と同様に、気中養生と屋外曝露の結果はほぼ同等と見なせる結果であった。そのため、以下では紙面の都合上、屋外曝露のデータ等を一部省略した。

W/B と脱型時期の条件が同じ場合、セメント種類によ

らず、W/B=0.4 で 1 日脱型のケースを除いた 10 ケースにおいて、密封養生の吸湿量が最も大きくなった。本研究ではこの原因を解明するまでに至っていないが、密封養生で形成される硬化組織が吸湿に寄与する空隙構造などを有している可能性があると考えており、細孔径分布などの詳細を今後調査する予定である。また、W/B と脱型条件が同じ場合、セメント種 BB の 6 ケースではすべて水中養生の吸湿量が最も小さくなった。セメント種 BB で水中養生を行ったケースでは、40℃での乾燥過程を経ても内部の含水状態が気中養生や屋外曝露の場合と比べて相対的に高い状態で維持され、吸湿量が小さくなった可能性がある。セメント種を BB とした場合は、水中養生で硬化組織が緻密化することが一般に知られており、強制乾燥後の吸湿による質量変化はそのような特性の差異を捉えている可能性がある。

(2) 水セメント比と脱型時期の影響

図-5 に W/B と脱型時期が吸湿時の質量変化に及ぼす影響を比較した例を示す。全供試体の測定結果に基づく知見および考察を以下に述べる。全体として図-5(a)のように W/B が高いほど吸湿量が増加したが、図-5(b)に例を示すようにセメント種が BB では W/B による差が小さくなる傾向が見られた。一般に W/B が高いほどセメント硬化体中の空隙が増加するため、吸湿量は多くなると考えられる。セメント種 BB はセメント種 N の一部を高

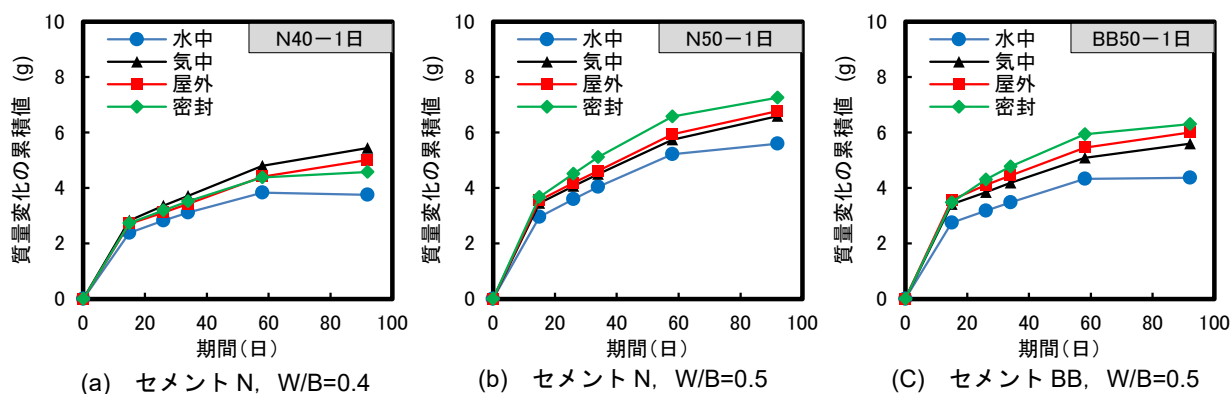


図-4 吸湿時の質量変化の例（養生条件の比較、1日脱型シリーズ）

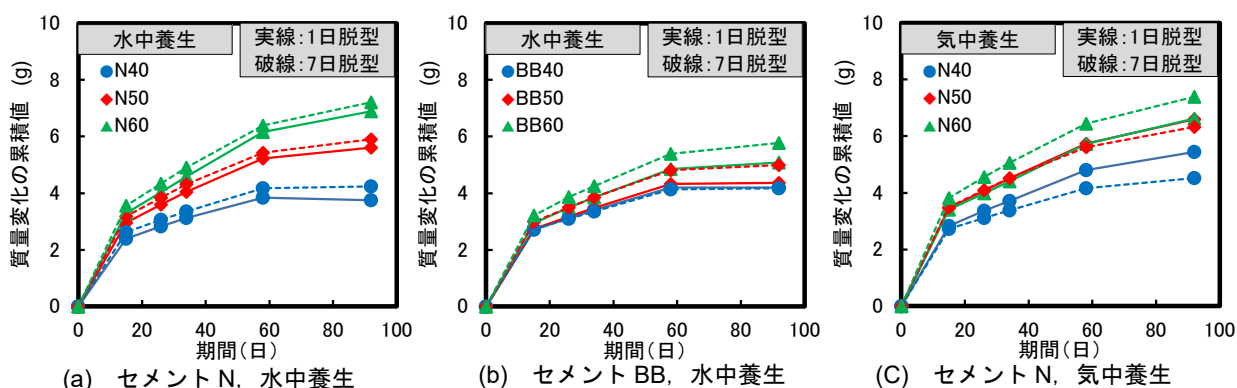


図-5 吸湿時の質量変化の例（脱型時期と W/B の比較）

炉スラグに置換した材料であるため、高炉スラグへの置換により W/B が吸湿量に及ぼす差が小さくなったものと解釈することができる。この現象の理由として、高 W/B により水量が増えることで増加した空間を高炉スラグの硬化組織が穴埋めをした形、あるいは、高炉スラグの反応による硬化組織は物質透過抵抗性の高い構造などを有している可能性が考えられる。特に、W/B が 0.5 および 0.6 のケースでは、養生条件によらずセメント種が BB の方がセメント種 N に比べて少ない吸湿量を示した。このことから、高炉スラグの反応により形成される硬化体は、W/B の高い条件で形成されるセメント硬化体に比べて物質透過抵抗性の高い空隙構造などを有している可能性が示唆される。

脱型時期の影響に関して、気中養生では、脱型時期が吸湿量の増減に及ぼす影響について一定の傾向は見られなかったが、図-5(a)および図-6 に示すように水中養生と密封養生では 7 日脱型の場合に吸湿量が多くなる傾向が見られた。材齢 28 日までの水中養生や密封養生を行う場合、早期脱型であるほど吸湿量の少ない硬化組織が形成される可能性がある。なお、密封養生については 3.2(1)で述べたように他の養生に比べて吸湿量が多くなる傾向が見られたため、留意する必要がある。今回の試験ケースでは、W/B=0.5 以上の場合、セメント種によらず、7 日脱型で密封養生を行った場合の吸湿量が最大となった。一般に、ラップによる密封養生は脱型後の追加

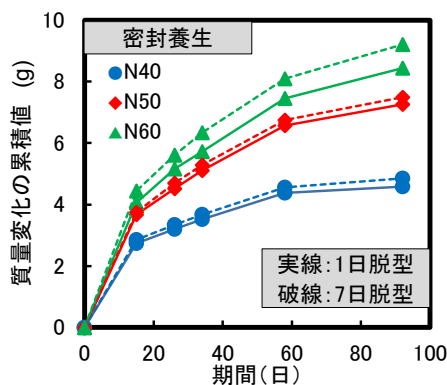
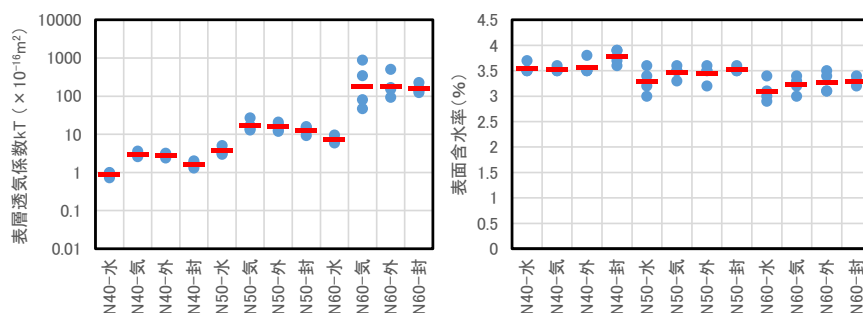


図-6 密封養生における吸湿時の質量変化



(a) 表層透気係数

(b) 表面含水率

図-7 表層透気係数と表面含水率の例（セメント N, 7 日脱型）

養生として実施されるケースが見られるが、高い W/B の場合で脱型までに 7 日程度の日数を確保した条件では、密封養生による追加的な養生効果は期待できない可能性が示唆された。このメカニズムは解明できていないため、ラップによる密封養生で形成される硬化組織の空隙構造や、物質透過抵抗性との関係性についてはさらなる検証が必要である。

3.3 表層透気係数および表面含水率

図-7 に表層透気係数および表面含水率の測定結果の例を示す。図中の各プロットが測定値、バーは平均値である。なお、平均値は同条件で作製した 2 体の供試体の A 面と B 面、4 個のデータの平均とした。なお、表層透気係数については算術平均が適さない場合があることから幾何平均とした。全体的な傾向として、表面含水率の差は小さいものの、W/B が低いほど表層透気係数は小さく表面含水率は高くなること、また水中養生および密封養生で相対的に表層透気係数は小さく表面含水率は高くなる傾向が確認された。

図-8 に表層透気係数と表面含水率の関係を示す。表面含水率はおおよそ 3~4% の狭い範囲に分布するのに対して、表層透気係数はおおよそ $1 \sim 1,000 \times 10^{-16} \text{m}^2$ の広い範囲に分布することがわかる。両指標には負の相関が見られるが、全データでは両指標の相関性は低くなり、同一の表面含水率でも表層透気係数は 1,000 倍程度異なることが読み取れる。このことから、表層透気係数は含水率に依存するが、物質透過抵抗性の差異を捉えていると考えて良いものと思われる。なお、図-7 および図-8 に示した各プロットに見られるように、同一の供試体でも測定結果はばらつくことから、表層透気係数および表面含水率を評価する場合、多点での測定データを用意する必要があると言える。

図-9 に供試体の強制乾燥後の吸湿量と表層透気係数の関係を示す。吸湿量は、20℃, 60%RH での吸湿開始から 26 日後および 91 日後の質量変化より算出した。図-9(a)および図-9(b)に示すように、セメント種 BB ではセメント種 N に比べて表層透気係数が高い傾向が見られ

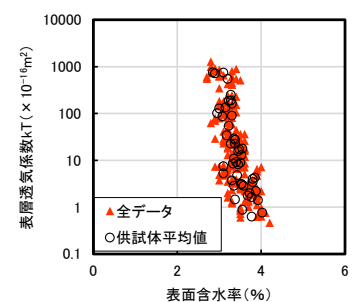


図-8 表層透気係数と表面含水率の関係

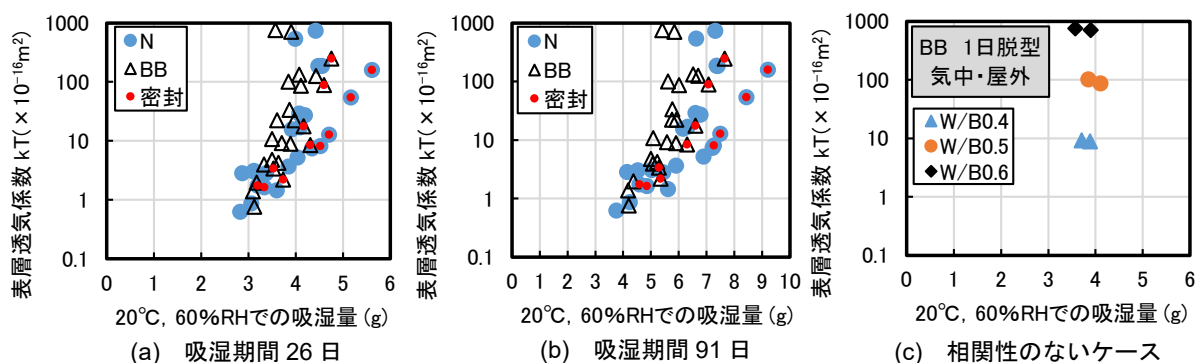


図-9 表層透気係数と吸湿量の関係

た。また、3.2 節で言及したように、今回の試験ケースでは高い W/B でラップによる密封養生を行った供試体の吸湿量は大きくなる傾向が確認されており、図-9(a)および図-9(b)からもそれを読み取ることができる。今回の試験条件において、強制乾燥後の吸湿量と表層透気係数に相関性が見られ、吸湿期間 26 日と 91 日でデータの相関関係はおおむね一致することが確認された。このことから、供試体の作製直後の待機期間を利用して取得可能な質量変化データにより、表層透気係数のような物質透過抵抗性に関連する指標を取得できる可能性が見出された。なお、本研究では質量変化を詳細に把握することを目的として質量 1kg 規模の供試体としたため、一般的な直径 100mm×高さ 200mm の円柱供試体等に適用するための乾燥条件等については別途検証が必要である。

一方、表層透気係数と吸湿量の相関性を低下させる要因として、図-9(c)に示すように、セメント種 BB で 1 日脱型とし、乾燥条件で養生したケースでは吸湿量が表層透気係数あるいは W/B によらず同等となったケースの存在がある。また、セメント種によらず、吸湿量が同等でも表層透気係数が大きく異なるデータが見られる。これらのことから、透気性と吸湿性ではそれに寄与する空隙構造が異なることが示唆される。空隙構造とこれらの指標との関係性については今後の課題とし、引き続き検証する予定である。

4. まとめ

本研究では、コンクリート供試体の所定の養生後 40℃ 環境での強制乾燥および乾燥後の吸湿による質量変化特性に着目し、W/B、使用セメント種別、脱型時期と養生条件の影響を検討した。また、材齢約 1.5 年で取得した表層透気係数との比較を行い、物質透過抵抗性の簡易評価を試みた。得られた主な知見は次のとおりである。

- (1) 作製直後の供試体における強制乾燥後の吸湿量と表層透気係数との間に正の相関が認められた。したがって、供試体作製直後の含水状態の調整に要する

数箇月程度の期間を利用し、質量変化を測定することで供試体の物質透過抵抗性を評価できる可能性が示された。

- (2) セメント種 BB の場合、水中養生および密封養生で脱型時期による水分含有量の差は見られなかった。水分含有量の観点で考えた場合、セメント種 BB では、型枠の存置による影響と、水中もしくは密封による養生の影響が同等であることが示唆された。
- (3) W/B が高いほど強制乾燥後の吸湿量が増加したが、高炉セメント B 種を使用した場合は W/B による差が小さくなる傾向が見られた。高炉スラグの反応による硬化組織は、W/B の高い条件で形成されるセメント硬化組織に比べて吸湿との関係性が弱い構造、あるいは物質透過抵抗性の高い構造などを有している可能性がある。
- (4) 材齢 28 日までの水中養生あるいは密封養生を行った場合、7 日脱型よりも 1 日脱型の場合に強制乾燥後の吸湿量が少なくなった。
- (5) ラップによる密封養生で強制乾燥後の吸湿量が増加するケースが確認された。密封養生で形成される硬化組織は吸湿に寄与する空隙構造などを有している可能性がある。また、高い W/B の場合は密封養生による追加的な養生効果は期待できない可能性が示唆された。

参考文献

- 1) 山崎順二，今本啓一，田中章夫，加藤猛：透気性試験における繰返し測定および試験機の検定に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.39，No.1，pp.1921-1926，2017
- 2) 酒井雄也，中村兆治，岸 利治：コンクリートの物質移動抵抗性を代表する空隙構造指標の抽出と検証，土木学会論文集 E2，Vol.70，No.4，pp.390-401，2014