

論文 蒸気養生コンクリートの空気量が耐久性に及ぼす影響

中上 明久*1・久道 雄一*2・湊 信之*2・上原 伸郎*3

要旨：蒸気養生コンクリートの硬化後空気量が各種耐久性に及ぼす影響について検討した。その結果、気泡径 300 μm 以下の空気量を 1.8%程度以上確保することにより、優れた凍結融解抵抗性が得られた。しかしながら、硬化後空気量が多くなると、物質透過性は大きくなり、中性化抵抗性および電気泳動試験で評価した塩化物イオン浸透抵抗性は低下した。一方で、塩水浸せき試験で評価した塩化物イオン浸透抵抗性は、大きな変化は見られなかったことから、エントレインドエアによる水分浸透抑制効果により、移流による塩化物イオンの移動が抑制された可能性が考えられた。

キーワード：蒸気養生, 耐久性, 塩化物イオン浸透, 中性化, 凍結融解, 細孔径分布, 気泡径分布

1. はじめに

コンクリート中の気泡は、ワーカビリティの改善、硬化コンクリートの凍結融解抵抗性向上に対して有効であることが一般的に知られている。特に、凍結融解抵抗性を確保するためには、必要量の微細な気泡を連行することが極めて重要である。

一方で、コンクリート中の気泡は、水、二酸化炭素や塩化物イオン等のコンクリート内部への侵入経路ともなり、空気量が増加すると、対象とする耐久性の項目によっては、その抵抗性が低下することも考えられる。例えば、空気量を変化させ、促進中性化試験による中性化深さや塩水浸せき試験により塩化物イオン浸透深さを測定した結果が報告^{1),2),3)}されている。

プレキャストコンクリート製品では、型枠の回転を早めるため、強度促進を目的に常圧蒸気養生（以下、蒸気養生と記す）が行われる。蒸気養生を行ったコンクリート（以下、蒸気養生コンクリートと記す）は、蒸気養生過程における温度上昇により、水や気泡が膨張するため、空気量が多くなると、膨張によりコンクリート組織が損傷し、常温で養生を行ったものの空気量と各種耐久性の関係とは異なる傾向を示すことが考えられる。

したがって本研究では、蒸気養生コンクリートについて、硬化コンクリートの空気量が耐久性（凍結融解抵抗性、塩化物イオン浸透抵抗性[電気泳動試験/塩水浸せき試験]、中性化抵抗性）に及ぼす影響を調べるとともに、同一配合で標準養生を行ったものと比較した。

また、硬化コンクリートの気泡径分布、硬化モルタル部分の細孔径分布、トレント法による表層透気係数 KT の測定を行い、硬化後空気量と各種耐久性の関連性について検討した。

2. 実験概要

2.1 実験要因

実験要因を表-1 に示す。実験要因は、空気量と養生条件である。空気量は、高性能減水剤（SP）のみを使用した空気量 2.5%を基本とし、消泡剤（AR）を添加して極力空気量を減らした 1.5%、AE 剤（AE）を添加して、気泡を連行した 5%、および空気量を極端に多くした 10%の 4 ケースとした。養生条件は、蒸気養生と比較用の標準養生である。空気量の調整は、マトリックスが同じで、空気量のみが変化したことを想定し、消泡剤あるいは AE 剤の使用量で行った。したがって、空気量増減に伴うスランブ変化に対する単位水量や高性能減水剤使用量の調整は行っていない。

2.2 供試体作製

(1) 使用材料

セメントは、普通ポルトランドセメント（C、密度：3.15g/cm³）、細骨材は、砕砂と陸砂を混合したもの（S、表乾密度：2.66 g/cm³、吸水率：1.18%）、粗骨材は、砕石（G、Gmax：15mm、表乾密度：2.84g/cm³、吸水率：0.87%）を使用した。また、高性能減水剤は、プレキャスト製品用の非空気連行型を用いた。

表-1 実験要因

記号	Air (%)	混和剤			養生条件
		SP	AE	AR	
1.5蒸	1.5	○	-	○	蒸気養生
2.5蒸	2.5	○	-	-	
5蒸	5.0	○	○	-	
10蒸	10.0	○	○	-	標準養生
1.5標	1.5	○	-	○	
5標	5.0	○	○	-	

*1 住友大阪セメント株式会社 セメント・コンクリート研究所（正会員）

*2 株式会社ホクエツ（非会員）

*3 住友大阪セメント株式会社 セメント・コンクリート研究所 博(工)（正会員）

(2) 配合およびコンクリート性状

空気量 2.5%の基本配合を表-2 に示す。コンクリートの練混ぜは、強制練りパン型ミキサを使用して行った。AE 剤および消泡剤の使用量、フレッシュ性状および圧縮強度の試験結果を表-3 に示す。標準養生と蒸気養生の供試体とともに作製するケースでは、練混ぜ量が多くなるため、2 バッチに分けて練混ぜを行ったが、バッチ間の空気量差は 0.5%以内であった。また、スランプは空気量が増加すると大きくなり、2.0~13.0cm であった。

(3) 供試体作製および養生

試験項目ごとに表-4 に示す供試体を作製した。供試体の締固めは、テーブルバイブレータを用いて行った。蒸気養生条件は、昇温速度 20°C/h、最高温度 60°C、最高温度保持時間 0.5 時間、降温速度は自然放冷とした。なお、前置時間は、作業工程上、12 時間とした。

蒸気養生後は、気中養生 (20±2°C, 60±5%RH) とした。また、標準養生は、20±2°Cでの水中養生である。脱型時期は、製品工場から試験所に運搬する必要があったため、いずれも材齢 3 日で行った。

2.3 試験項目および試験方法

各種試験は、蒸気養生の場合で材齢 14 日、標準養生は材齢 29 日で前処理を行い、試験を開始した。

(1) 気泡径分布測定

φ100×200mm 円柱供試体の上下 25mm 部分を除く位置から、φ100×50mm の円盤供試体を切り出し、研磨粉で研磨した後、気泡径分布測定に供した。気泡径分布の測定は、ASTM C 457 のうち「リニアトラバース法」に準じ、上下の 2 断面について行った。

(2) 細孔径分布測定

φ100×200mm の円柱供試体の上下 25mm 部分を除く位置から、2.5 ~5mm のモルタル部分を取り出し、アセトンに 24 時間以上浸せきして水和を停止させた。その後、24 時間以上、D-dry 法により真空乾燥させ、測定用試料に供した。細孔径分布の測定は、水銀圧入式ポロシチーメーター (測定範囲:3nm~282μm) を用いて行った。

(3) 圧縮強度試験

圧縮強度試験は、JIS A 1128 に準じて、蒸気養生が材齢 14 日、標準養生は材齢 29 日で行った。

(4) 凍結融解試験

試験体を水中に 2 日間浸せきした後、JIS A 1148 の A 法に準じて、凍結融解試験を行った。

(5) 電気泳動試験

電気泳動試験は、JSCE G571-2013 に準じて行った。φ100×200mm の円柱供試体の上下端部約 25mm を除く部分から、φ100×50mm の円盤型試験体を切り出した。試験体は、円周面をエポキシ樹脂で塗布し、4 日間以上養生した後に減圧吸水させて試験に供した。

表-2 基本配合

Gmax (mm)	Air (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
				W	C	S	G	SP
15	2.5	41	50	143	350	959	1024	3.08

表-3 コンクリート性状

試験体 種類	AE (kg/m ³)	AR (kg/m ³)	SL (cm)	Air (%)	圧縮強度 (N/mm ²)
1.5蒸	0	0.018	2.0	1.4	51.0
2.5蒸	0	0	2.5	2.2	49.0
5蒸	0.016	0	9.0	5.2	42.4
10蒸	0.032	0	13.0	10.0	34.9
1.5標	0	0.018	2.0	1.9	67.6
5標	0.016	0	7.0	5.5	54.4

蒸気養生：材齢14日、標準養生：材齢29日

表-4 供試体種類および個数

試験項目	供試体種類	個数
気泡径分布測定、細孔径分布測定(共用)	φ100×200mm	1
圧縮強度試験	φ100×200mm	3
凍結融解試験	□100×100×400mm	2
電気泳動試験、塩水浸せき試験	φ100×200mm	2
表層透気試験、促進中性化試験(共用)	□150×150×200mm	2

(6) 塩水浸せき試験

φ100×200mm の円柱供試体の上下端部約 25mm を切断して、試験体とした。試験体は、室内 (20±2°C, 60±5%RH) で 12 時間乾燥した後、端面片側を除く全面をエポキシ樹脂で被覆し、室内 (20±2°C, 60±5%RH) で 4 日間以上養生した。試験体は、20±2°Cで 2 日間水中浸せきを行った後、10%NaCl 水溶液に浸せきした。浸せき期間 94 日で試験体を割裂し、割裂面に 0.1N 硝酸銀溶液を噴霧した。試験面から白色化した箇所を深さをノギスを用いて測定し、塩化物イオン浸透深さとした。

(7) 表層透気試験

室内 (20±2°C, 60±5%RH) に 28 日間保存した後、表層透気係数 KT (ダブルチャンバーを用いたトレント法)、および表面水分量(高周波容量式)の測定を行った。測定面は、試験体の 2 側面 (150×200mm) とした。

(8) 促進中性化試験

表層透気試験終了後、試験体の 2 側面を除く 4 面をアルミ粘着テープでシールし、20±2°C, 60±5%RH, 炭酸ガス濃度 5±0.5% の中性化促進条件で保存した。促進期間 91 日において試験体を割裂し、割裂面にフェノールフタレイン溶液を噴霧した後、試験面から未発色部をノギスにより測定し、中性化深さとした。

3. 実験結果および考察

3.1 気泡径分布測定

リニアトラバース法で測定した硬化コンクリートの

空気量（以下、硬化後空気量と記す）を図-1 に示す。凍結融解抵抗性に影響する気泡径の範囲や必要量については、諸説^{4),5),6)}あるが、本研究では、気泡径 300 μm 以下の空気量（以下、300 μm 以下の空気量と記す）に着目した。図-1 より、フレッシュコンクリートの空気量と硬化後空気量を比較すると、空気量の多い 10 蒸でやや減少量が大きいものの、その他は、硬化後空気量においても目標の空気量が確保されている。

次に、300 μm 以下の空気量をみると、5 蒸と 5 標は、いずれも硬化後において 4.7%以上の空気量が確保されているものの、5 標の 300 μm 以下の空気量が 5 蒸に比べて約 50%と少ない値となっている。この理由は明確ではないが、成型後の養生温度の差により、標準養生の方が蒸気養生に比べて 300 μm 以下の気泡の消泡度合が大きかったことが考えられる。

3.2 細孔径分布測定

細孔径分布を測定した結果を図-2、図-3 に示す。まず、図-2 より、蒸気養生コンクリートについて、硬化後空気量と細孔量を見る。10 蒸を除く、硬化後空気量が 5.3%までは、硬化後空気量が増加すると、0.003-0.05 μm の細孔量はほとんど変わらないが、0.05-1 μm および 1-282 μm の細孔量が増加しており、その結果、0.003-282 μm の細孔量（以下、全細孔量と記す）も増加傾向を示している。しかし、硬化後空気量が 8.8%と多い 10 蒸では、5 蒸に対して、1-282 μm と 0.05-1 μm は微増、0.003-0.05 μm は減少しているため、全細孔量としてはわずかに減少傾向に転じ、硬化後空気量と全細孔量との関係は頭打ちとなる傾向を示した。また、本研究における配合の差異が AE 剤あるいは消泡剤の使用量のみであることから考えると、0.05-1 μm の細孔量、およびこれを含む全細孔量の差は、毛細管空隙と繋がる気泡量差に起因していると推察する。

次に、図-3 に同程度の硬化後空気量における、蒸気養生と標準養生の全細孔量を比較すると、蒸気養生の方が標準養生に比べて、全細孔量が多い値となっている。これは、蒸気養生後の養生条件を気中養生としており、水和の進行に必要な水分の供給がなかったことも影響していると考えられる。

3.3 圧縮強度試験

硬化後空気量と圧縮強度の関係を図-4 に示す。図-4 より、硬化後空気量と圧縮強度の間には線形関係が見られ、蒸気養生についてみると、硬化後空気量 1%の増加に対する圧縮強度の低下割合は 4.5%と、一般的な 4~6%と同程度であった。

このことから、硬化後空気量 8.8%においても、気泡膨張によるひび割れ等の内部損傷は発生していないと判断した。

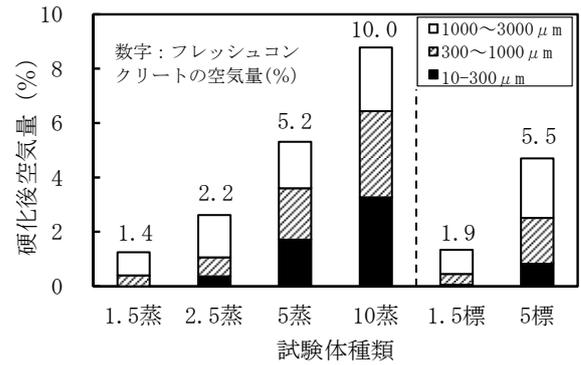


図-1 気泡径分布測定結果

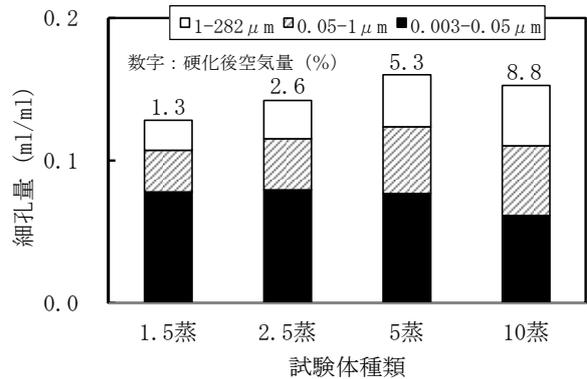


図-2 細孔径分布測定結果(1)

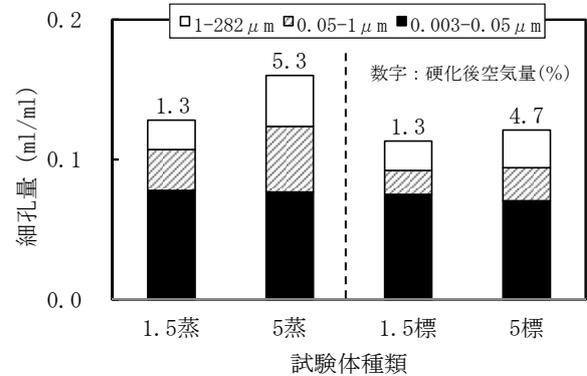


図-3 細孔径分布測定結果(2)

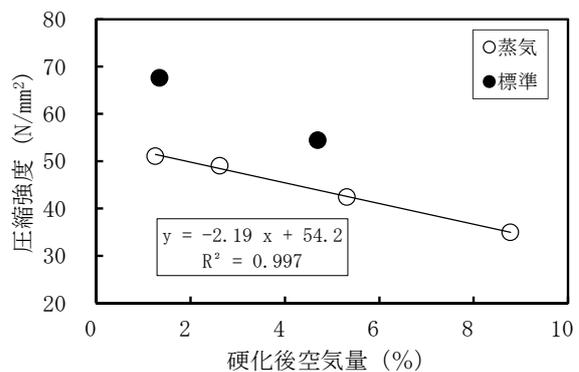


図-4 硬化後空気量と圧縮強度の関係

3.4 凍結融解試験

サイクル数と相対動弾性係数の関係を図-5に示す。図-5より、硬化後空気量が2.6%以下の場合、養生条件に関わらず、サイクル数60~120サイクルで相対動弾性係数が60%以下になっている。しかし、蒸気養生では、硬化後空気量が5.3%の5蒸、および8.8%の10蒸は、優れた凍結融解抵抗性を示している。一方、標準養生の5標（硬化後空気量4.7%）は、270サイクルで相対動弾性係数が60%以下の値となっている。

300 μ m以下の空気量と耐久性指数の関係を図-6に整理した。図-6より、蒸気養生において、300 μ m以下の空気量が1.8%程度以上あれば耐久性指数が100以上となっている。このことは、300 μ m以下の空気量が1.8%程度以上確保されると優れた凍結融解抵抗性が得られるとする既往の報告⁴⁾と一致している。一方、標準養生の5標の相対動弾性係数が60%以下の値になったのは、300 μ m以下の空気量が0.8%と1.8%の半分程度と少なかったためと考えられる。

以上のように、蒸気養生コンクリートにおいて、ひび割れ等の内部損傷が発生していない場合、300 μ m以下の空気量を1.8%程度以上とすることにより、優れた凍結融解抵抗性が期待できると考えられる。

3.5 電気泳動試験

硬化後空気量と実効拡散係数の関係を図-7に示す。図-7より、蒸気養生および標準養生ともに、硬化後空気量が多くなると実効拡散係数が増加する傾向がある。一方、3.2節において、硬化後空気量が多くなると全細孔量が増加する傾向があり、また、全細孔量の差は毛細管空隙と繋がる気泡量の差を示すと考えられた。これらのことから、硬化後空気量が増加すると、毛細管空隙と繋がる気泡量が増えるために物質透過性が大きくなり、実効拡散係数が増加したと推察される。

また、同程度の硬化後空気量における、蒸気養生と標準養生の実効拡散係数を比較すると、蒸気養生の方が標準養生に比べて大きな値となっている。これは、3.2節で示したとおり、蒸気養生の方が標準養生に比べて同程度の硬化後空気量における全細孔量が多いため、物質透過性が大きかったと考えられる。

次に、細孔量と実効拡散係数の関係を図-8に示す。なお、細孔量は、実効拡散係数に影響する細孔径区分をみるために、3つの区分に分けて示した。また、細孔径区分ごとに、蒸気養生と標準養生を合わせた6点について求めた回帰線、回帰式および決定係数 R^2 を示した。図-8より、細孔量の多い範囲においてばらつきが大きくなっているものの、0.05-1 μ mと1-282 μ mの2つの区分において、決定係数 R^2 がそれぞれ0.888、0.840となっており、相関性が高い結果となった。

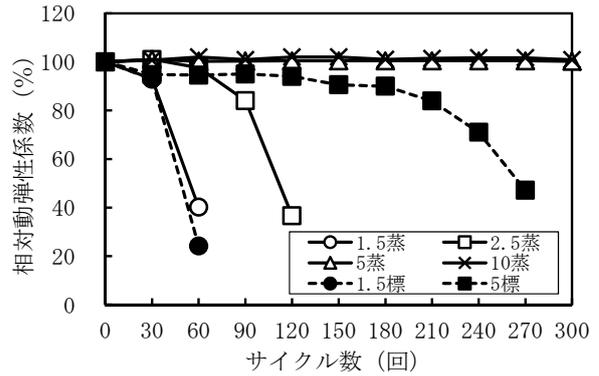


図-5 サイクル数と相対動弾性係数の関係

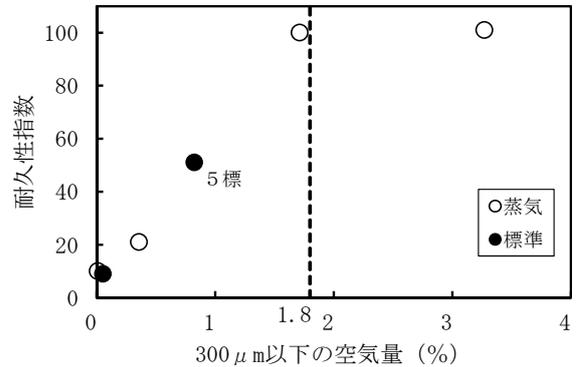


図-6 300 μ m以下の空気量と耐久性指数の関係

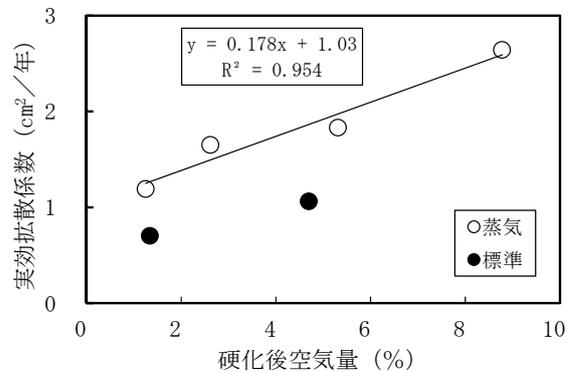


図-7 硬化後空気量と実効拡散係数の関係

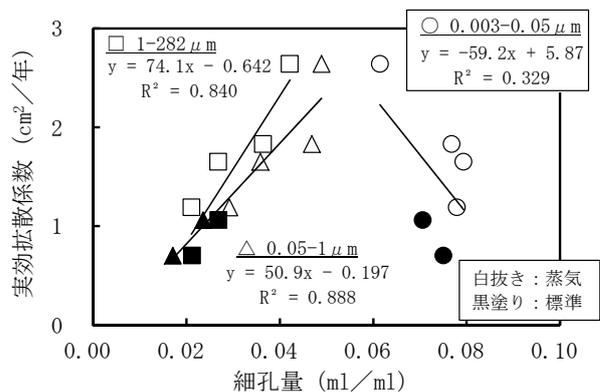


図-8 細孔量と実効拡散係数の関係

これらのことは、内部の気泡が毛細管空隙量として測定された結果であると推察され、毛細管空隙と気泡とが試料内で連結していることを示唆していると考えられる。

以上のことから、硬化後空気量が多くなると、電気泳動試験により評価した塩化物イオン浸透抵抗性（以下、急速塩分浸透抵抗性と記す）は低下する。これは、毛細管空隙に繋がる気泡量が増加することにより、物質透過性が大きくなるためと考えられた。

3.6 塩水浸せき試験

塩化物イオン浸透深さの測定結果を図-9に示す。図-9より、蒸気養生の1.5蒸から2.5蒸で、塩化物イオン浸透深さが若干増加しているが、これを除くと、蒸気養生および標準養生ともに、硬化後空気量の増加に伴う浸透深さの増加は認められない。

塩化物イオンの拡散は、水分移動に伴う移流と塩化物イオンの濃度勾配を駆動力として起こるとされている。このうち、移流による塩化物イオンの浸透深さは、水の浸透深さと関係が深いと考えられることから、塩水浸せき前の2日間的水中浸せき期間、および塩水浸せき期間における試験体の質量変化測定結果を図-10に整理した。図-10より、水中浸せきを2日間実施した後の塩分浸せき期間中においても質量は増加していることから、水分の浸透が確認された。また、硬化後空気量が多くなっても、水中浸せき期間と塩水浸せき期間を比べた際の質量の増加傾向に顕著な差異は認められず、むしろ蒸気養生では、2.5蒸以降で逆に減少傾向に転じている。

既往の報告⁷⁾において、絶乾状態の供試体に吸水させる実験で、空気量が増えると吸水量が減少した結果を基に、コンクリート中の空気（エントレインドエア）には外部からの侵入水を遮断する効果があると述べられており、本実験でも同様の傾向が認められた。ここで、外部からの侵入水を遮断する効果のある気泡（エントレインドエア）の範囲を10-300 μm 程度と考えると、図-10より、1.5蒸から2.5蒸の間では、硬化後空気量中に占める300 μm 以下の空気量の割合が1.5蒸で0.0%、2.5蒸では15.4%（ $0.4/2.6 \times 100$ ；図中数値参照）と比較的少なく、質量は増加傾向を示している。一方、2.5蒸から10蒸までの間では、5蒸で32.1%（ $1.7/5.3 \times 100$ ）、10蒸で37.5%（ $3.3/8.8 \times 100$ ）と比較的多く、質量は減少傾向を示している。これらのことから、本実験においては、エントレインドエアに、侵入水を遮断する効果があったと考えられる。

以上のように、急速塩分浸透抵抗性と相違し、硬化後空気量が増加しても、塩水浸せき試験で評価した塩化物イオン浸透抵抗性（以下、浸せき塩分浸透抵抗性と記す）に大きな変化が見られない結果となっている。これは、硬化後空気量が多くなると物質透過性が大きくなる反面

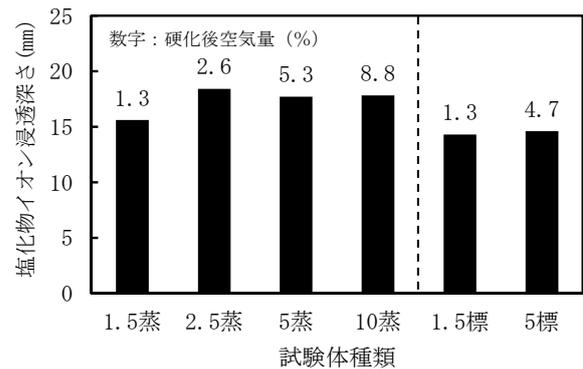


図-9 塩化物イオン浸透深さ測定結果

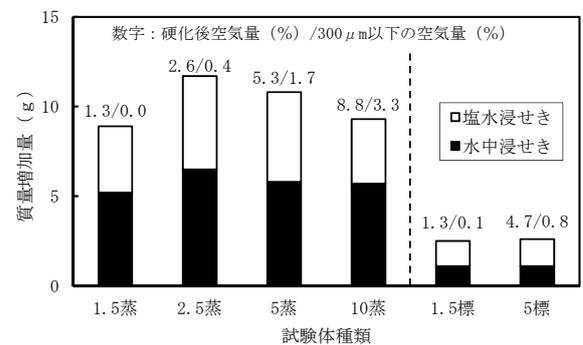


図-10 質量変化測定結果

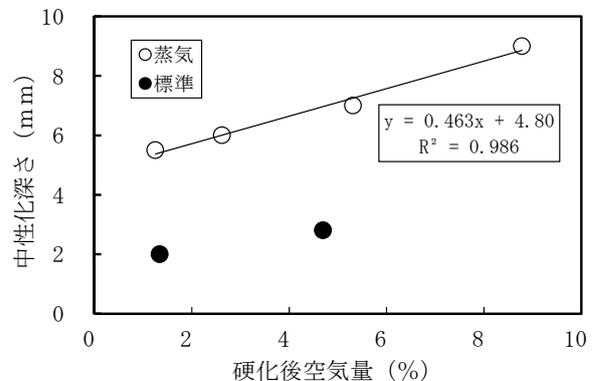


図-11 硬化後空気量と中性化深さの関係

エントレインドエアによる水分浸透抑制効果により、移流による塩化物イオンの移動が抑制された可能性が考えられた。

3.7 促進中性化試験および表層蒸気試験

硬化後空気量と中性化深さの関係を図-11に示す。図-11より、蒸気養生および標準養生ともに、硬化後空気量が多くなるほど、中性化深さが大きくなる傾向が認められた。なお、同程度の硬化後空気量における、蒸気養生と標準養生の中性化深さを比較すると、蒸気養生の方が標準養生に比べて大きな値となっている。

中性化は、コンクリート表面から二酸化炭素が浸入す

ることにより生じることから、中性化抵抗性は表層部分の気体の通り易さと関連が深いとされている。硬化後空気量と促進中性化試験開始前に実施したトレント法による表層透気係数KT（以下、KTと記す）との関係を図-12に示す。なお、KTの測定時、表面水分量を測定したが、蒸気養生で4.3~4.6%、標準養生で4.9~5.0%と、いずれの試験体も5.0%以下であった。

図-12より、蒸気養生において、硬化後空気量が多くなるほど、KTが大きくなり、気体が透過しやすくなっている。

以上のように、硬化後空気量が多くなると、物質透過性が大きくなることから、中性化抵抗性が低下する可能性が考えられる。

3.8 KTと実効拡散係数および中性化深さの関係

KTと実効拡散係数および中性化深さの関係を図-13に示す。図-13より、KTと実効拡散係数および中性化深さの間に高い相関関係が認められることから、本実験の範囲内においては、硬化後空気量の差に対する急速塩分浸透抵抗性および中性化抵抗性の変化を表層透気係数KTを測定することにより、ある程度評価することが可能であると考えられる。

4. まとめ

本実験の範囲内で、蒸気養生コンクリートの硬化後空気量が各種耐久性に及ぼす影響は、以下の傾向が認められた。

- (1) ひび割れ等の内部損傷が発生していない場合、気泡径300 μm 以下の空気量を1.8%程度以上とすることにより、優れた凍結融解抵抗性が得られる。
- (2) 硬化後空気量が多くなると、電気泳動試験で評価した塩化物イオン浸透抵抗性は低下するものの、エントレインドエアによる水分浸透抑制効果により、移流による塩化物イオン浸透が抑制されると考えられることから、塩水浸せき試験で評価した塩化物イオン浸透抵抗性については、大きな変化を示さないと考えられる。
- (3) 硬化後空気量が多くなると、物質透過性が大きくなることから、二酸化炭素が透過しやすくなり、中性化抵抗性が低下する可能性がある。

参考文献

- 1) 柴享太, 阿部道彦, 築地健: コンクリートの中性化に及ぼす空気量の影響, 日本建築学会関東支部研究報告集 80(I), pp.53-56, 2010.3

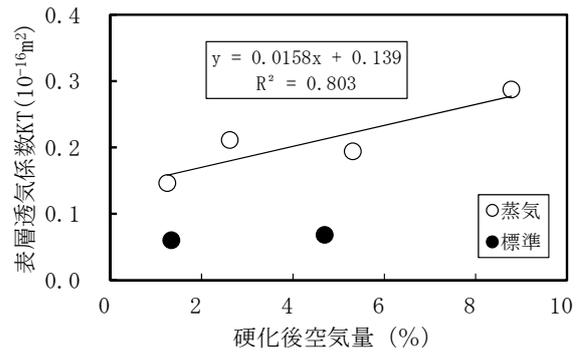


図-12 硬化後空気量とKTの関係

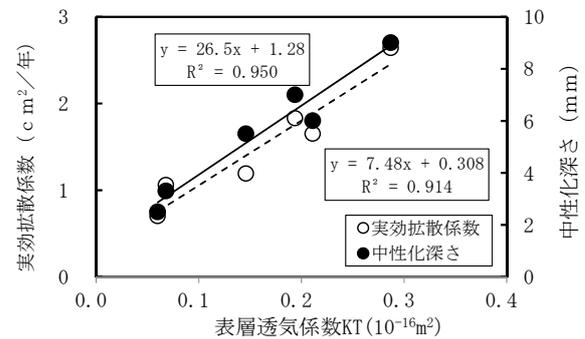


図-13 KTと実効拡散係数および中性化深さの関係

- 2) 古賀裕久, 渡辺博志, 河野広隆, 片平博: 使用材料の異なるコンクリートの耐久性能と吸水性状の関係, セメント・コンクリート論文集, Vol.67, pp.456-463, 2013
- 3) 張金喜, 藤原忠司, 西城能利雄, 阿部哲: 各種配合のコンクリートの塩分環境下における耐凍害性, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.2, pp.625-629, 2001
- 4) Jochen Stark ほか, (訳) 太田利隆ほか: コンクリートの耐久性, 社団法人セメント協会, pp.181-184, 2003.8
- 5) 濱幸雄, 平野彰彦, 田畑雅幸, 新大軌: コンクリートの気泡組織に影響する要因と耐凍害性に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 73, No. 634, pp. 2061-2067, 2008.12
- 6) 坂田昇, 菅俣匠, 林大介, 橋本学: コンクリートの気泡組織と耐凍害性の関係に関する考察, コンクリート工学論文集, Vol. 23, No. 1, pp. 35-47, 2012.1
- 7) 片平博, 河野広隆: 小径コアの短時間吸水量に着目したコンクリートの耐久性評価法の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol. 24, No. 1, pp. 1599-1604, 2002