

論文 施工条件に起因するコンクリート微細組織の差異が透気性および中性化抵抗性に及ぼす影響

高橋 直希*1・藤倉 裕介*2・津野 和宏*3

要旨: 中性化抵抗性に代表される物質移動抵抗性を非破壊評価する手法の一つとして透気試験が挙げられる。本研究では、比較的大きな試験体を用いて、気泡と空隙という異なるスケールでコンクリート内部構造を評価し、透気係数および中性化抵抗性に与える影響を総合的に検討した。その結果、透気係数により施工時の締固めおよび養生の良否を相対的に評価できる可能性が示唆された。さらに、中性化抵抗性は 40nm 以上の空隙量、透気性は気泡量および 200nm 以上の空隙量が影響することがわかった。

キーワード: 気泡、細孔径分布、透気性、中性化抵抗性

1. はじめに

社会基盤の老朽化が進む中で、コンクリート構造物の耐久性能を向上させることは、構造物の長寿命化と維持管理コストの削減に直結する重要課題である。特に、鉄筋の腐食を防ぐための中性化抵抗性の確保は、構造物の健全性を長期にわたり維持する上で欠かせない要件である。対象となる構造物において、中性化抵抗性を含めた物質移動抵抗性を直接的かつ的確に把握し、その後の耐久性を適切に評価することは、維持管理計画や寿命予測において極めて重要となる。これらのことから、施工されたコンクリートの品質を直接的に評価し、その結果に基づいて構造物の耐久性を検証するシステム整備が求められており、多くの研究が進められている^{例え、2),3)}。

中性化抵抗性に代表される物質移動抵抗性を非破壊評価する手法の一つとして透気試験が挙げられる。透気試験により得られる透気係数はコンクリートの含水状態の影響を受けるものの、透気係数と中性化深さの間に正の相関関係があることが報告されている^{例え、2)}。しかし、これらの研究の多くは、セメントの種類や水結合材比 (W/C) を変更⁴⁾、あるいは同一配合であっても早期脱型後の乾燥条件を含む養生条件下で実施された検討^{3),5)}が中心となっている。また、5 日以上を養生を実施することで、養生方法間における中性化速度係数の違いが小さくなることも確認されている⁶⁾。これは、施工条件のうち特に施工後初期の養生条件が、コンクリートの表層空隙構造の緻密化や水和反応の促進などを通じて、中性化抵抗性に大きな影響を及ぼすことを示している。さらに、養生方法による空隙の小径化が必ずしも中性化の抑制効果を高めているわけではない⁷⁾との指摘もある。すなわち、コンクリートの内部構造が変化しているにもかかわらず、中性化現象が必ずしも敏感に応答しない場合

があり、結果として透気係数と中性化抵抗性の相関が弱まる可能性が示唆される。

締固めは密実で均質なコンクリートにするために行うものであり、スランブで管理するコンクリートでは振動時間が 5~15 秒程度とされている。締固め後の硬化コンクリートをリニアトラバース法により評価した結果、棒状パイプレータによる締固めでは、粗大な気泡よりも 0.3mm 以下の微細な気泡の方が締固めの影響を受けにくく、残存しやすいことが報告されている⁸⁾。さらに、坂野らは、微視的な視点から締固め時間がコンクリート内部の細孔構造や中性化に及ぼす影響を検討し、締固め時間の増加によって積算空隙量が減少した一方で、微小かつ連続的な空隙の増加により物質移動抵抗性が低下した可能性を指摘している^{例え、9)}。これらの検討は 0.01~数 mm 程度の比較的大きな気泡(以下、気泡と称する)または nm~ μ m オーダーの微細な空隙(以下、空隙と称する)のいずれかのスケールのみでの議論であることに加え、テストピースでの検討であることから実構造物における内部の気泡や空隙の分布を十分に再現できない可能性がある。

本研究では、締固めおよび養生条件が内部構造をどのように変化させ、それがコンクリート構造物の品質にどの程度反映されるかを明らかにすることを目的とし、比較的大きな試験体を用いて、mm オーダーの気泡と nm~ μ m オーダーの空隙という異なるスケールでコンクリート内部構造を評価し、透気係数および中性化抵抗性に与える影響を総合的に検討した。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

本実験では、普通ポルトランドセメントを使用した呼び強度 24N/mm²、スランブ 12cm のレディーミクストコ

*1 (株)フジタ 技術センター 土木研究部 修士(工学)(正会員)

*2 (株)フジタ 技術センター 土木研究部 博士(工学)(正会員)

*3 国士舘大学 理工学部 理工学科 教授 博士(工学)(正会員)

表-1 コンクリートの配合および使用材料

Gmax (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						
			W	C	S1	S2	G1	G2	Ad
20	58.3	46.3	170	292	587	251	301	689	3.94

S1：砕砂，表乾密度 2.62g/cm³，粗粒率 3.00

S2：砂，表乾密度 2.59g/cm³，粗粒率 1.80

G1：碎石2005，表乾密度 2.69g/cm³，実積率 61.0%

G2：碎石2005，表乾密度 2.65g/cm³，実積率 59.5%

Ad：AE減水剤（リグニンスルホン酸化合物とポリカルボン酸エーテルの複合体）

ンクリートを使用した。コンクリートの配合および使用材料を，表-1 に示す。また，試験体寸法，打込み位置，棒状パイプ挿入位置および各種試験における測定あるいはコア採取箇所を，図-1 に示す。打込みはホッパーを用いて行い，締固めはφ52mm の棒状パイプにより 15 秒間振動を付与した。測定箇所の名称は，棒状パイプ挿入位置に最も近い側面の箇所を「締固め位置からの距離 0mm」とし，200mm ずつ 6 箇所とした。

試験体は，養生条件毎に，圧縮強度試験用の試験体を 3 体，透気係数試験および気泡量試験用の試験体をそれぞれ 3 体作製した。さらに，中性化試験については養生条件毎に 2 体，計 6 体の試験体を作製し，細孔径分布試験は気泡量試験に用いたコアから採取した試料を用いた。

2.2 養生方法

本実験における養生は，屋内静置(以下，気中)，フィルム被覆(以下，封緘)および湿布(以下，湿潤)の 3 種類とした。コンクリートの打込みから材齢 5 日までは型枠側面を存置し，その後，材齢 28 日まで上記の養生を施した。なお，試験体は上記の養生期間およびその後の期間にわたって，湿度制御のない 20℃の屋内環境下で保管した。

2.3 試験項目とその方法

試験項目は，圧縮強度，見掛けの密度，中性化抵抗性，透気性，気泡(0.01~5mm)および空隙(3nm~200μm)とした。

(1) 圧縮強度および見掛けの密度

圧縮強度および見掛けの密度は，図-1 に示すように，測定箇所から φ100×200mm のコアを両側面から 2 本ずつ，合計 12 本採取し，JIS A 1107 に準拠して算出した。コアの採取は材齢 4 週経過後に実施し，採取後のコア試験体は温度 20℃，湿度 60%の恒温室に保管し，材齢 6 週にて試験を実施した。なお，結果は両側面 2 本のコア試験体の平均値を用いた。

(2) 中性化深さおよび中性化速度係数

中性化抵抗性は，試験体から φ100×200mm のコアを採取し，促進環境下に保管した後，中性化深さおよび中性化速度係数により評価した。コアの採取は，材齢 4 週経過後に実施し，コア採取後は材齢 8 週まで温度 20℃，湿度 60%の恒温室に保管した。試験面は試験体側面とし，試験面以外をテープにてシーリングした。中性化の促進条件は，JIS A 1153 を参考に，温度 20℃，湿度 60%，二

●：打込みおよび棒状パイプ挿入位置
○：測定あるいはコア採取箇所 (単位：mm)

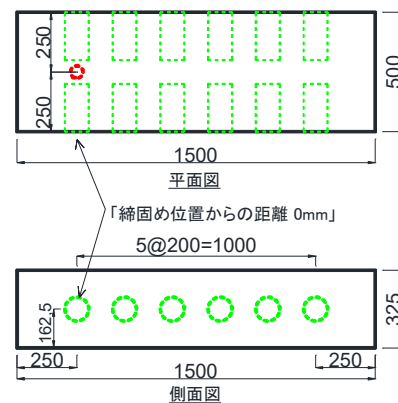


図-1 試験体寸法および測定箇所

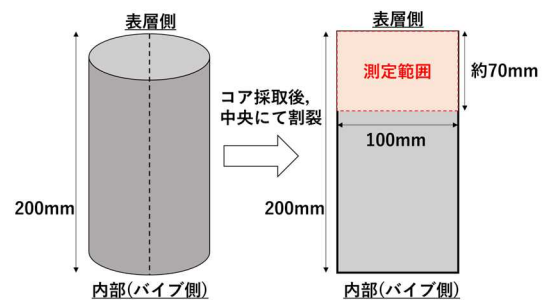


図-2 気泡計測範囲

酸化炭素濃度 5%とし，促進期間は 4，8 および 13 週間とした。所定の促進期間終了後はコア試験体を割裂し，フェノールフタレイン溶液噴霧によって中性化深さを測定した。また，中性化深さから $\sqrt{t}$ 則に則り中性化速度係数を算出した。なお，促進 4 週時は，1 試験体の両側面から採取した 2 本のコアの平均値，8 および 13 週時は 1 試験体の片側面 1 本のコアを用いて評価を行った。

(3) 透気係数

透気性は，トレント法による透気試験で測定した。試験装置は内部チャンバーと外部チャンバーの二つの構造からなり，内部チャンバーの圧力変化から透気係数を算出する。測定箇所は，図-1 に示す側面の箇所とし，測定材齢は，材齢 6 および 17 週とした。また，透気係数に及ぼすコンクリート中水分の影響が指摘されているため³⁾，静電容量式の含水計で含水率を測定した。

(4) 気泡量

本測定の対象となる気泡の寸法は 0.01~5mm とした。試験方法は，ASTM C457 によるリニアトラバース法に準拠した，気泡計測とした。測定対象は，試験体から φ100×200mm のコアを採取し，図-2 に示すように，切断面が 100×200mm の長方形となるよう長手方向に切断後，切断面の表層側で深さ約 70mm までの 100×70mm の範囲とした。測定表面は研磨材を用いて平滑に研磨し，洗浄・乾燥後に試験を実施した。トラバース長は，ASTM C457

による骨材最大寸法 20mm における最小値(2286mm)以上となるよう 2412.96mm と設定し、線トラバース長を横切る気泡個数および気泡径を測定した。

(5) 細孔径分布

試験方法は水銀圧入法による細孔径分布測定とし、対象となる空隙の寸法は 3nm~200 μ m とした。測定には、気泡量計測後のコア試験体から採取した、図-3 に示す、約 20mm $\times$ 35mm の試料を粉体して用いた。コア試験体は材齢 4 週までの所定の養生終了後に採取したものであり、その後、材齢 13 週までは 20 $^{\circ}$ C、60%の恒温室に保管した。その後、試料調整、水和停止および 1 週間真空乾燥させ、材齢 17 週にて測定を実施した。

試験水準は、締固め位置からの距離を 0, 400, 800mm とし、養生の違いによる影響を確認するため、気中養生および湿潤養生の試験体とした。また、締固め位置からの距離 0mm 箇所については、内部方向に 100, 200mm の位置でも測定した。試料の名称については、「養生の種類-締固め位置からの距離-内部方向の距離」とした。

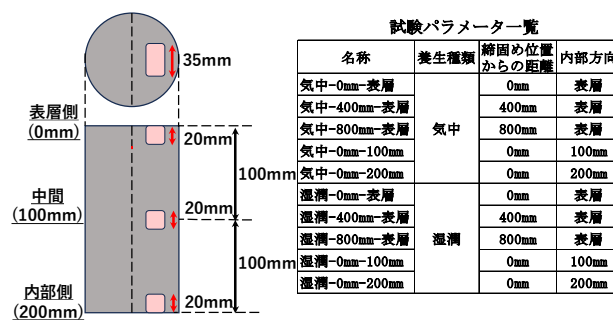


図-3 細孔径分布測定箇所

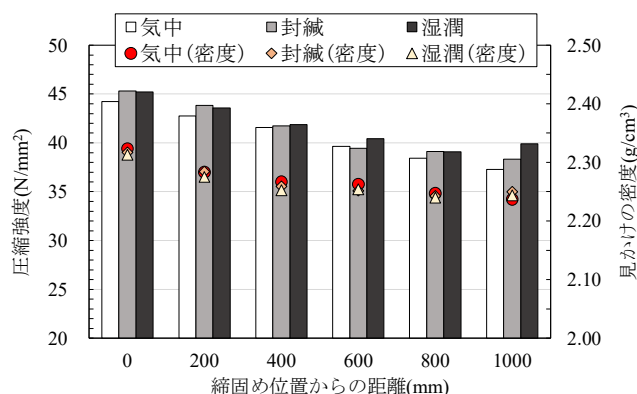


図-4 圧縮強度および見掛けの密度

3. 実験結果および考察

3.1 圧縮強度および見掛けの密度

圧縮強度および見掛けの密度を、図-4 に示す。凡例上段は圧縮強度(棒グラフ)、下段は見掛けの密度(プロット)である。圧縮強度は、締固め位置からの距離が大きくなるほど顕著に低下した。見掛けの密度は、締固め位置からの距離が大きくなるほど密度の低下が見られるものの、400mm 以降では変化が小さくなった。見掛けの密度はコア試験体の寸法と重量を用いて算出したため、内部の微細な気泡・空隙の存在を必ずしも正確に捉えられず、異なる傾向を示したものと考えられる。

3.2 中性化深さおよび中性化速度係数

中性化深さおよび中性化速度係数の結果を、図-5 および表-2 に示す。促進期間が長くなるほど中性化深さは大きくなっている。一方、締固めと養生の違いによる明確な傾向は確認できなかった。また、中性化速度係数も締固めや養生による傾向は確認できなかった。

中性化抵抗性に影響を与えるとされているのは、40 μ m 以上の径を持つ細孔量に依存していることが報告されている¹⁰⁾。一方、締固めでは 0.3mm 以下の気泡の残存率が高くなる⁸⁾ことから、締固めにより除去できる主たる気泡径は 0.3mm 以上と、はるかに大きな気泡である。また、本研究のように材齢 5 日まで型枠存置した場合、ある程度十分に水和が進行しており、その後の養生の違いによる空隙構造の違いが小さくなったことも考えられる。内部構造については、後述の結果と合わせて考察を行う。

3.3 透気係数

透気試験による計測結果を、図-6 に示す。測定時の含

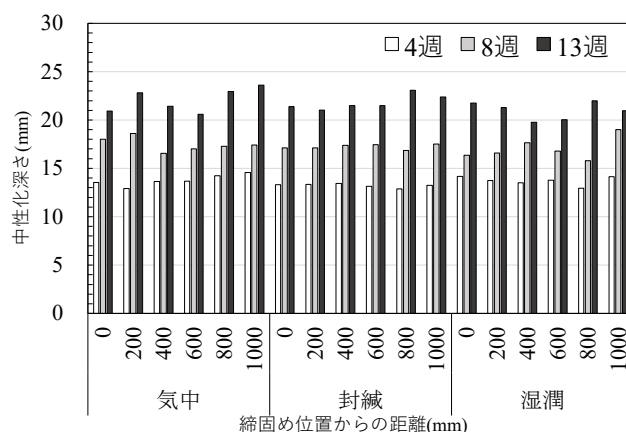


図-5 中性化深さの関係

表-2 中性化速度係数の一覧

単位: mm/ $\sqrt{\text{週}}$

養生種類	締固め位置からの距離					
	0mm	200mm	400mm	600mm	800mm	1000mm
気中	5.80	6.33	5.94	5.71	6.37	6.55
封緘	5.93	5.83	5.96	5.96	6.40	6.21
湿潤	6.03	5.90	5.48	5.56	6.10	5.81

水率は、材齢 6 週時で 5.6~6.4%と比較的高い一方、材齢 17 週時では 4.7~5.2%となり、いずれの箇所も 5.5%以下であった。なお、締固め位置からの距離による含水率の違いは見られなかった。

透気係数は、材齢および養生によらず、締固め位置からの距離が大きくなるほど増加傾向にあり、その傾向は気中養生で顕著であった。養生の違いによる透気係数は、気中養生が最も大きく、次いで封緘養生、湿潤養生の順

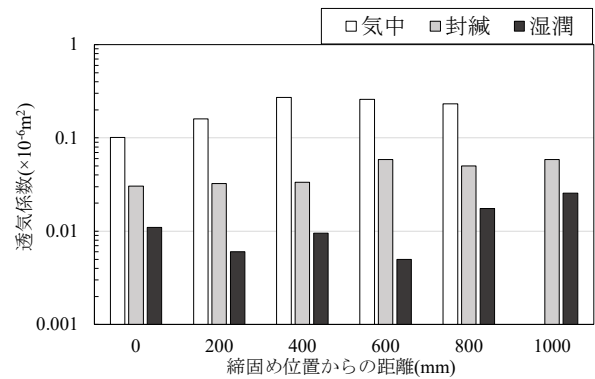
に小さくなった。締固めによる気泡の除去が透気性の向上に寄与すると考えられるが、封緘養生や湿潤養生のように水和反応を十分に進展させ得る環境下では、気泡除去効果よりも水和反応による組織の緻密化が透気性に強く影響すると推察される。以上の結果から、野島ら¹¹⁾も指摘しているように、透気係数から中性化抵抗性を推定することが困難な場合があることを再確認した。

締固めおよび養生の透気係数への影響度合いは、材齢 6 週においては、養生条件の違いによる透気係数の変動幅が大きく、1～2 オーダー程度の変化が認められた。締固め位置からの距離による透気係数の変化は 1 オーダー未満であるものの、距離が大きくなるほど透気係数は大きくなる傾向であった。これに対して、材齢 17 週においては、養生条件の影響が緩和され、透気係数の変化幅は 1 オーダー程度に縮小した。これは、既往の研究¹²⁾と同様、養生による透気係数への影響は短期的なもので、材齢の経過とともに養生方法による透気係数の差が縮小したものと考えられる。また、材齢 17 週時点における締固め位置からの距離による透気係数の変化は、材齢 6 週と同様の傾向となった。これらの結果は、施工時の締固めおよび養生の良否を相対的に評価できる可能性を示唆している。ただし、材齢の進行とともに透気係数の差が小さくなるため、施工の良否を判定する場合は、比較的早期で施工条件による差が顕在化している時期に評価することが望ましいと考えられる。一方、含水率が高い場合には危険側の評価となる¹³⁾ため、早期に測定した透気係数を耐久性指標として用いる場合には注意が必要となる。

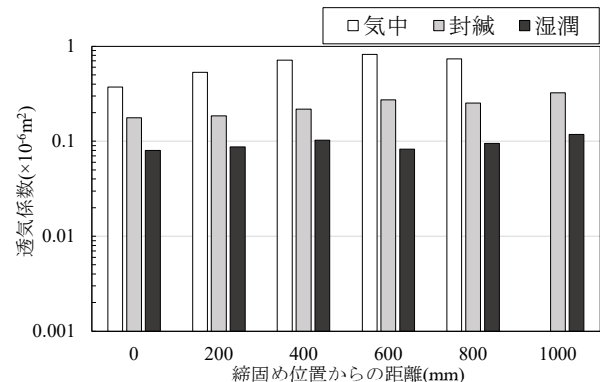
3.4 気泡量

気泡量の計測結果を、図-7 に示す。締固め位置からの距離が小さくなるほど気泡量が減少する傾向を示し、特に締固め位置からの距離が 400mm 以下の場合には、気泡量が線形に低下する傾向が明確に確認できた。振動の有効範囲がおおよそパイプレータの直径の 10 倍程度であることを鑑みれば、この範囲内では振動が強く作用し、気泡除去が促進されたと考えられる。一方、養生の種類による気泡量の明確な差異は確認できなかった理由としては、材齢の進行に伴う水和反応によって 0.2 μ m 以下の細孔量が減少する¹⁰⁾という報告があるものの、気泡計測における気泡の検出限界を下回っており、養生条件との関連性が把握できなかったと考えられる。

気泡量と圧縮強度の関係を、図-8 に、気泡量と材齢 17 週時点の透気係数の関係を、図-9 に示す。圧縮強度は、気泡量と比較的良好な相関を示しており、気泡量を用いてコンクリートの密実性を評価できる可能性がある。一方、透気係数は、養生の種類によって傾向が異なり、気中養生や封緘養生など透気係数が比較的大きい場合には、気泡量との相関性が認められる。他方、湿潤養生などの



(a) 材齢 6 週における透気係数



(b) 材齢 17 週における透気係数

図-6 透気試験結果

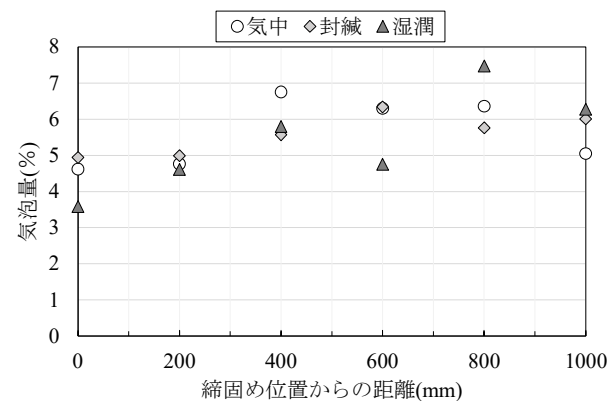


図-7 気泡量の関係

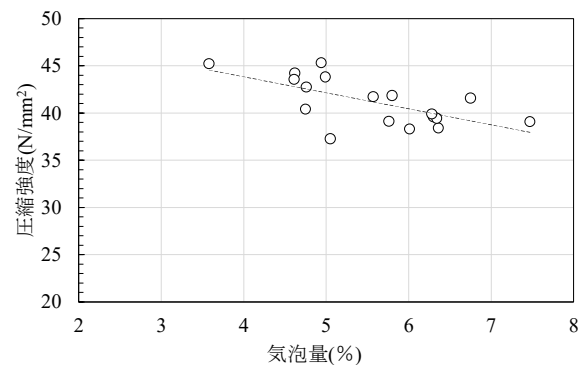


図-8 気泡量と圧縮強度の関係

水分供給が行われ透気係数が小さい場合には、比較的径が大きな気泡の量のみで密実性を評価することは難しく、透気係数は、微細な空隙量や空隙の連続性など他の要因

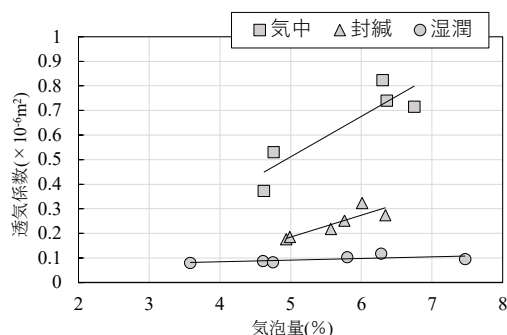


図-9 気泡量と透気係数の関係

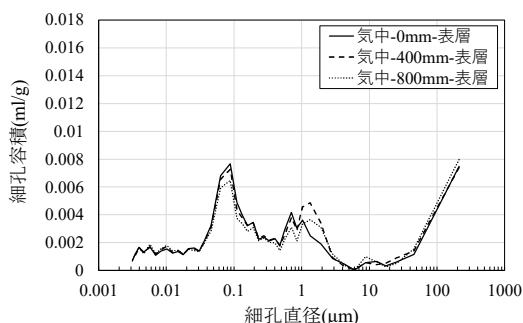


図-10 表層側(気中)における細孔径分布

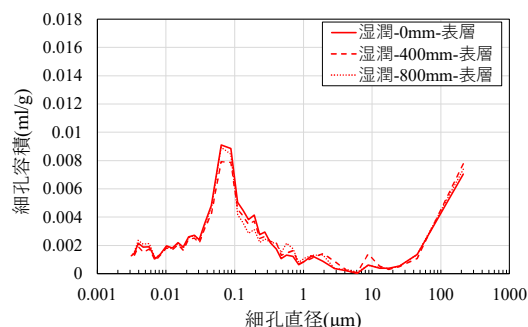


図-11 表層側(湿潤)における細孔径分布

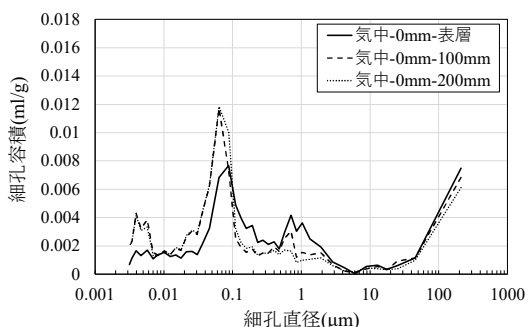


図-12 内部方向(気中)における細孔径分布

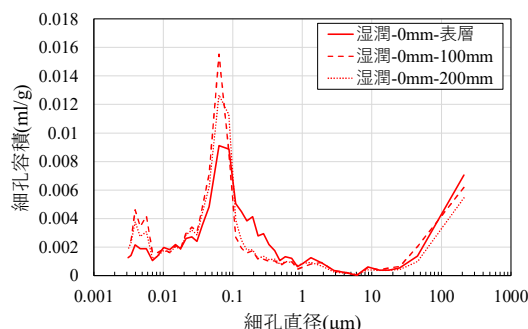


図-13 内部方向(湿潤)における細孔径分布

の影響を受けることが示唆された。また、気泡量が施工条件によって異なるものの、中性化抵抗性には違いが見られなかった要因としては、既往の研究¹⁴⁾と同様、比較的大きな気泡が存在しても、平均的な中性化進行に与える影響はほとんどなかったものと考えられる。

3.5 細孔径分布

気中養生および湿潤養生の表層側における細孔径分布を、図-10, 11 に示す。また、内部方向(表層, 100, 200mm)の細孔径分布を、図-12, 13 に示す。なお、試料容積に対する空隙容積の割合である細孔率はいずれも 18.6~19.9% であり、顕著な差異は認められなかった。

同一の養生条件下では、締固め位置からの距離による細孔径分布の変化は確認されず、締固めが空隙量および空隙構造に与える影響は小さいと推察される。一方で、養生条件や内部方向によっては 200nm~2μm 付近の空隙量に大きな違いが生じており、気中養生と比較して湿潤養生、あるいは表層部と比べて内部方向(100, 200mm)において、空隙量が減少する傾向が明瞭にみられた。これらは、外部への水分逸散抑制または外部からの水分供給により空隙構造が変化したものと考えられる。

気中養生および湿潤養生の表層側における積算細孔容積を、図-14 に示す。中性化進行に支配的な影響を及ぼすとされる 40nm 以上の空隙量¹⁰⁾に着目すると、気中養生で 0.071~0.079ml/g、湿潤養生で 0.070~0.072ml/g と同程度であった。本検討では、同一配合のために空隙構造が大きく変化していないことに加えて、養生条件による細孔径の分布は異なるものの 40nm 以上の空隙量に大きな差が生じなかったことが、中性化抵抗性に有意な差異をもたらさなかった一因であると考えられる。

次に、透気係数に影響を及ぼす空隙に着目する。透気性に影響を及ぼす空隙は数 100nm 以上¹⁵⁾といわれており、養生による差が生じている 200nm 以上の空隙量で整理した。この結果、気中養生では 0.040~0.046ml/g、湿潤養生では 0.028~0.031ml/g であり、両者の間に約 4 割の差が生じていた。この差異が透気性の違いを生じた主要因であると推察される。

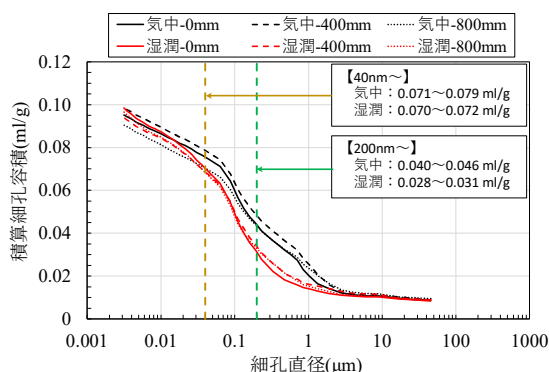


図-14 表層側における積算細孔容積

上記と気泡の結果から、透気性に関しては、気泡のみでは空気の移動経路を形成できず、微細な空隙を介して気泡が連結することで透気係数が変化する可能性が示唆された。すなわち、透気係数を支配する要因は、単なる気泡の総量ではなく、それらを連結しうる微細空隙の存在量と空気移動経路の形成であると考えられる。今回の範囲では、200nm以上の空隙量が多い場合、気泡の連結確率が高まり、空気の移動経路が形成された結果として、透気係数と気泡量との相関性が認められたと推察される。

一方、中性化抵抗性に関しては、気泡量が中性化深さおよび中性化速度係数に対して顕著な影響を及ぼさないことが確認された。さらに、同一配合で養生条件が異なる場合でも、40nm以上の空隙量が同程度である場合には、中性化抵抗性に大きな差異は生じないと考えられる。

4. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 透気係数により施工時の締固めおよび養生の良否を相対的に評価できる可能性が確認された。
- (2) 気泡量は、算入される気泡の径が比較的大きいため、気中や封緘養生など透気係数が比較的大きい場合には透気係数との相関性が認められるが、湿潤養生などの透気係数が小さい場合には相関性が認められず、気泡のみで施工の良否を評価することは難しい。また、気泡量が施工条件によって異なるものの、中性化抵抗性には違いが見られなかった。
- (3) 透気性は気泡量および 200nm 以上の空隙量の影響を受けることが確認された。また、透気性には、気泡そのものの総量よりも、それらと連結しうる微細空隙の存在が透気性に深く関わっていると考えられる。一方で、40nm以上の空隙量に影響を受けるとされる中性化抵抗性とは、直接の相関は見られなかった。このため、透気係数を用いた中性化抵抗性の評価については、更なる検討が必要である。

謝辞

本研究の遂行にあたり、国士舘大学の張雯笛氏、前原凜氏にご協力を頂きました。ここに感謝の意を示します。

参考文献

- 1) 構造物表面のコンクリート品質と耐久性能評価システム研究小委員会(335委員会)成果報告書, 土木学会コンクリート技術シリーズ 80, 2008
- 2) 早川健司, 水上翔太, 加藤佳孝: 表面透気試験による構造体かぶりコンクリートの品質評価に関する基礎的研究, 土木学会論文集 E2, Vol.68, No.4, pp.385-398, 2012

- 3) 蔵重勲, 廣永道彦: 脱型時期や曝露環境がコンクリートの強度特性や表層透気性ならびに中性化抵抗性に及ぼす影響の実験的評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.623-628, 2010
- 4) 林亮太, 檀原弘貴, 添田政司, 松本涼: 透気係数による各種コンクリートの物質移動抵抗性評価方法に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.745-750, 2013
- 5) 白根勇二, 舟橋政司, 松尾健二: 施工条件や養生条件がコンクリート表層部の品質に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.1313-1318, 2010
- 6) 檀康弘, 伊代田岳史, 大塚勇介, 佐川康貴, 濱田秀則: 高炉スラグ微粉末を混入したコンクリートの養生条件と耐久性の関係, 土木学会論文集 E, Vol.65, No.4, pp.431-441, 2009
- 7) 宮原茂禎, 丸屋剛, 岸利治: 排水・水中養生したコンクリートの耐久性評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.767-772, 2011
- 8) 片平博, 古賀裕久: 振動締固めが凍結融解・スケリング抵抗性に与える影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.999-1004, 2016
- 9) 坂野大世, 山田悠二, 川崎佑磨: 振動締固め時間がコンクリートの圧縮破壊過程および中性化与える影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.43, No.1, pp.887-892, 2021
- 10) 郭度連, 宇治公隆, 国府勝郎, 上野敦: 養生条件によるコンクリートの組織変化と中性化を支配する細孔径の評価, 土木学会論文集, No.718, Vol.57, pp.59-68, 2002
- 11) 野島昭二, 渡邊晋也, 藤原貴央, 谷倉泉: 透気係数を用いたコンクリートの品質評価と測定条件に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.2134-2139, 2014
- 12) 横山勇氣, 酒井雄也, 半井健一郎, 岸利治: 異なる配合と養生と与えたコンクリートの表層透気係数の経年変化, セメント・コンクリート論文集, Vol.71, pp.410-416, 2018
- 13) 渡邊晋也, 野島昭二, 藤原貴央, 谷倉泉: コンクリート中の水分量が表層透気試験の透気係数および測定深さにおよぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.2002-2006, 2016
- 14) 池田雄治, 加藤祐彬, 三田勝也, 加藤佳孝: 打重ねが表層透気係数に及ぼす影響, 第 40 回土木学会関東支部技術研究発表会, V-53, 2013
- 15) 羽原俊祐, 沢木大介: 硬化コンクリートの空隙構造とその物性, 石膏と石灰, No.240, pp.28-37, 1992