

論文 フレッシュコンクリートの空気量が硬化体の空隙および物質移動抵抗性に及ぼす影響に関する実験的検討

田澤 佑介*1・鈴木 将充*2・加藤 絵万*3・加藤 佳孝*4

要旨：コンクリートの製造から構造物の完成までの空隙の特徴と硬化特性の関係性については、検討が不十分である。そのため、フレッシュコンクリートの空気量と硬化体の空隙および物質移動抵抗性との関係を実験的に整理することを目的に、AE 剤の添加量を調整してフレッシュ時の空気量を変化させ、硬化体の空隙率および物質移動抵抗性を調べた。フレッシュ時の空気量によらず硬化体の空隙率および気泡量は変化しないが、気泡間隔係数が変化するとともに、気泡間隔係数と、乾燥のしやすさ、水分浸透速度および表層透気係数には一定の関係が確認できた。

キーワード： 空気量, 空隙率, 気泡間隔係数, 水分浸透速度係数, 表層透気係数

1. はじめに

コンクリート中には、nm オーダーから最大 mm オーダーまでの大小様々な空隙が存在している。文献¹⁾によると、空隙は大きく分けて練混ぜ時に混入した空気による気泡と、水が占めていた部分の水泡に分類される。練混ぜ時に混入した気泡は、エントラップドエアとエントレインドエアに分類される。エントラップドエアの空隙径は 1mm 以上と極めて大きく、コンクリートの強度や物質の透過に対する抵抗性等の硬化特性を低下させる要因になり得る。一方、エントレインドエアは AE 剤によって連行した気泡であり、50~200 μ m 程度の独立した球形の空隙で、耐凍害性やワーカビリティを確保する上で必要となる。対して水が占めていた部分の水泡は、ゲル空隙と毛細管空隙に分類される。ゲル空隙は 1~3nm 程度の極めて小さな空隙であり、乾燥収縮に対して影響を及ぼす可能性があると考えられている。また、毛細管空隙の空隙径は 3nm~30 μ m 程度とされており、物質の透過に影響するため、コンクリートの各種耐久性を理解する上で最も重要な空隙である。

ここで、コンクリート構造物のコンクリートに着目し、コンクリートの製造から構造物の完成までの空隙の特徴について整理する。コンクリートの製造過程で混入した気泡は、打込み、締固め等の施工の影響を受けて変化する。コンクリートの打設後の硬化過程では、施工過程で残存した気泡に加えて、水和反応に伴って空隙構造が形成され、硬化体の空隙特性が定まる。ここで定まった空隙特性がコンクリートの硬化特性に影響を与えられられる。既往の研究では、硬化体の空隙特性と硬化特性の関係を検討した報告は多く存在するものの、コンクリ

ートの製造から構造物の完成までの空隙の特徴と硬化特性の関係性については、検討が不十分であると考えられる。

そのため、これらの一連の関係性を把握することを最終目的とし、本研究では、その基礎段階として施工の影響については排除し、フレッシュコンクリートの空気量と、硬化体の空隙および物質移動抵抗性との関係を実験的に整理することを目的とした。具体的には、AE 剤の添加量を調整してフレッシュコンクリートの空気量を変化させ、硬化体の空隙率および物質移動抵抗性を調べた。

2. 実験概要

2.1 使用材料およびコンクリート配合

使用材料を表-1に、配合を表-2に示す。JIS A 5005の細骨材の粒度分布の範囲とするため、S1とS2の容積比を0.63と0.37とした。コンクリート配合は、一般的な土木工事に用いる条件を想定し、水セメント比50%、スランプ12cmとした。また、空気量が4.5 \pm 1.5%のときに目標スランプ12cmが得られるように単位水量を調整した。空気量の調整は、基準となる空気量が4.5 \pm 1.5であることを考慮し、3%以下(UNDER3)および6%以上(OVER6)になるようにAE剤の使用量の調整により実施した。あわせて、AE剤を使用していないNON-AEの配合も準備した。なお、AE剤の使用量の調整により練上がり時の目標空気量を変化させたが、配合計算上の空気量は4.5%で一定とした。

2.2 練混ぜ方法

練混ぜにはパン型ミキサ(容量50L)を用い、1バッチの製造量を30Lとした。細骨材およびセメントを投入し

*1 東京理科大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 (学生会員)

*2 東急建設(株) 技術研究所 土木材料G 修士(工学) (正会員)

*3 港湾空港技術研究所 客員研究官 博士(工学) (正会員)

*4 東京理科大学 理工学部土木工学科 教授 博士(工学) (正会員)

表-2 配合表

記号	目標 空気量 (%)	目標 スランブ (cm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					混和剤 AE (C×%)	フレッシュ試験結果	
					W	C	S1	S2	G		スランブ (cm)	空気量 (%)
NON-AE	-	12	50	45	185	370	500	279	958	-	9.0	0.6
UNDER 3	3 以下									0.006	10.5	1.8
4.5	4.5 程度									0.012	11.5	4.3
OVER 6	6 以上									0.02	11.5	6.6

表-1 使用材料

種類	記号	物理的性質
セメント	C	普通ポルトランドセメント, 密度 3.15g/cm ³
細骨材	S1	多摩産砕砂, 表乾密度 2.70g/cm ³ , F.M. 2.82
	S2	君津産山砂, 表乾密度 2.57g/cm ³ , F.M. 1.52
粗骨材	G	多摩産碎石, 表乾密度 2.67g/cm ³ , F.M. 6.58
混和剤	AE	AE 剤 (樹脂酸系界面活性剤) * 100 倍希釈で使用
水	W	上水道水, 密度 1.00g/cm ³

て 10 秒間空練りしたのち、あらかじめ混和剤を溶解した練混ぜ水を投入して 30 秒間練り混ぜ、最後に粗骨材を投入して 60 秒間練り混ぜ、試料を排出した。試験は温度 20°C の屋内で実施した。

2.3 試験方法の概要

本研究では、JIS A 1128 に示される手順に従い、コンクリート試料を詰めて無注水法により空気量を測定した。

硬化体の空隙率および物質移動抵抗性を把握するために、排出された試料から円柱試験体 φ100×200mm を 3 本作製した。円柱試験体は、材齢 28 日まで水中養生したのち、打込み面および打込み底面を含んだまま、高さ約 50mm の 4 つに分割し、式(1)からアルキメデス法による空隙率 P(%) (以降、空隙率) を算出するため、飽水質量 $W_b(g)$ と水中質量 $W_c(g)$ を測定した。

$$P = \frac{W_b - W_a}{W_b - W_c} \times 100 \quad (1)$$

その後、12 体すべてを温度 40°C、湿度 30% で 48 日間静置し、この時の質量を乾燥質量 $W_a(g)$ とした。ここで求まる空隙率が、硬化体中に存在した水分が逸散してできた空隙である。その後、水分浸透性は、短期の水掛かりを受けるコンクリート中の水分浸透速度係数試験方法 (案) JSCE G 582 に準じて行い、打込み底面側を除く 9

体から得られた平均を試験結果とした。また、水分浸透試験後の質量変化率と水分浸透深さの関係が示されている²⁾ため、水分浸透試験前後で試験体の質量を 0.1g 単位で測定した。なお、質量変化率は、水分浸透試験直前の質量を基準とし、各試験時間後に測定した質量差を百分率で表した。透気性は、円柱試験体の打込み底面を対象に、コンクリートの表層透気試験方法規格 NDIS 3436-2 に準じて行い、打込み底面側 3 体の相乗平均を試験結果とした。

3. フレッシュコンクリートの空気量と空隙率および物質移動抵抗性との関係

3.1 AE 剤の添加量

AE 剤の添加量を調整してフレッシュコンクリートの空気量を変化させた結果を表-2、図-1 に示す。AE 剤の添加量の増加に伴い、空気量は増加した。

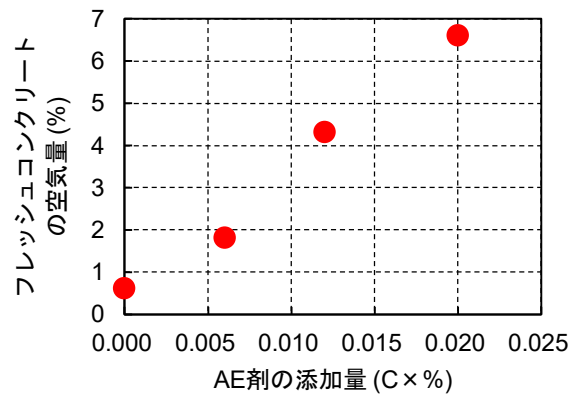


図-1 AE 剤の添加量とフレッシュ時の空気量の関係

3.2 アルキメデス法による空隙率

フレッシュコンクリートの空気量と空隙率の関係を図-2 に示す。フレッシュコンクリートの空気量によらず、空隙率は同程度の値となる結果が得られた。空隙率は水セメント比に大きく依存することが知られている¹⁾。ここでは、AE 剤の添加量以外のコンクリート配合が同じであることから、フレッシュコンクリートの空気量に関わらず、空隙率が同程度となったと考えられる。

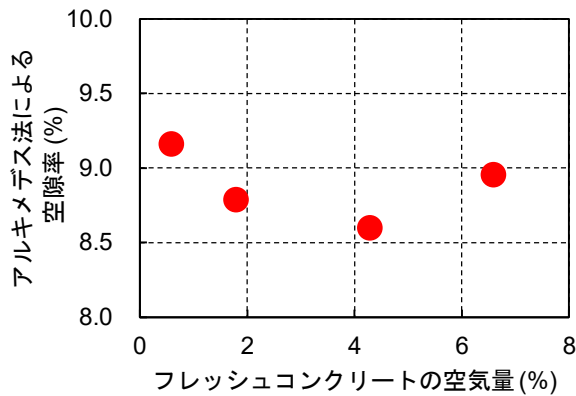


図-2 フレッシュ時の空気量と空隙率の関係

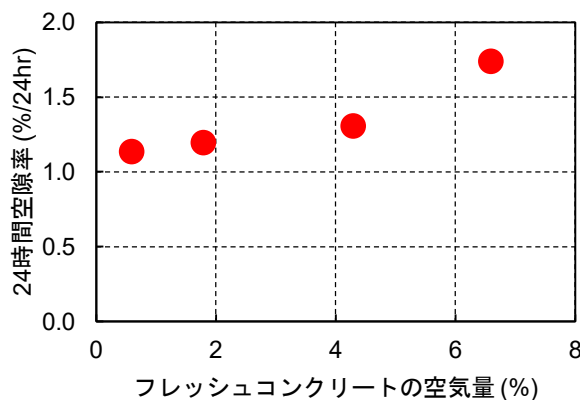


図-3 フレッシュ時の空気量と24時間空隙率の関係

ここで、硬化体に形成された空隙の連続性が異なると、乾燥に伴う質量減少の速度に変化があると考えられるため、空隙率測定時の乾燥初期に着目し、飽水状態から24時間乾燥後の質量を W_a (g)とし、式(1)より算出した。これを24時間空隙率と称する。フレッシュコンクリートの空気量と24時間空隙率の関係を図-3に示す。フレッシュコンクリートの空気量の増加に伴い24時間空隙率が大きくなる結果となった。これは、全体の空隙率は同程度であるが、フレッシュコンクリートの空気量が空隙の連続性に影響している可能性があるため、24時間空隙率が変化したと推察される。

3.3 水分浸透速度係数試験

時間ごとの質量変化率の関係を図-4に示す。水分浸透深さの結果から、48時間では試験体全体にわたって吸水が進んだ。そのため、以降では24時間での質量変化率を用い、文献³⁾を参考に、各浸せき時間の平方根に対する質量変化率の近似直線の傾きを、質量変化率による水分浸透速度係数とする。フレッシュコンクリートの空気量と質量変化率による水分浸透速度係数の関係を図-5に示す。フレッシュコンクリートの空気量の増加に伴い、質量変化率は増加する傾向があるが、UNDER 3と4.5の配合では同程度となった。

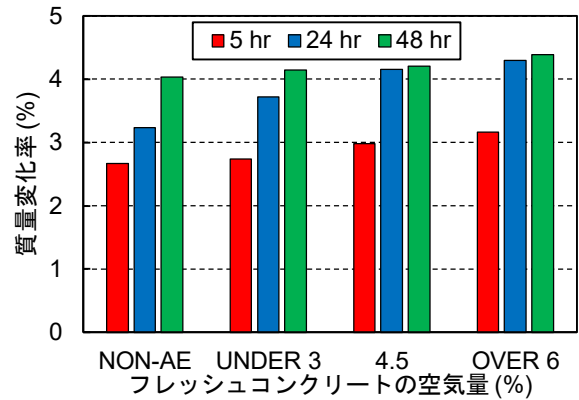


図-4 配合毎の質量変化率

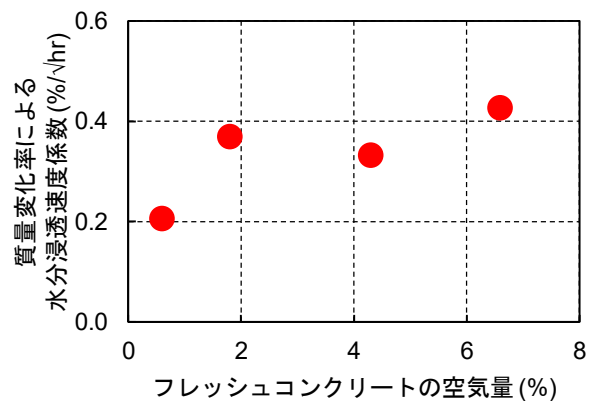


図-5 フレッシュ時の空気量と質量変化率による水分浸透速度係数の関係

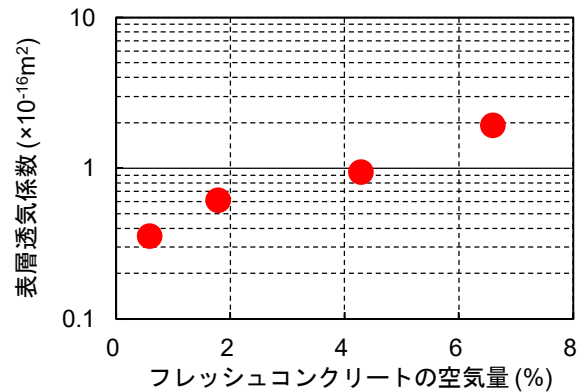


図-6 フレッシュ時の空気量と表層透気係数の関係

3.4 表層透気試験

フレッシュコンクリートの空気量と表層透気係数の結果を図-6に示す。フレッシュコンクリートの空気量の増加に従い、表層透気係数は増加した。

3.5 3章のまとめ

AE剤の添加量の増加に伴いフレッシュコンクリートの空気量は増加した。空気量のみを変化させた配合では、フレッシュコンクリートの空気量によらず空隙率はほぼ一定値を示したが、24時間空隙率、質量変化率による水

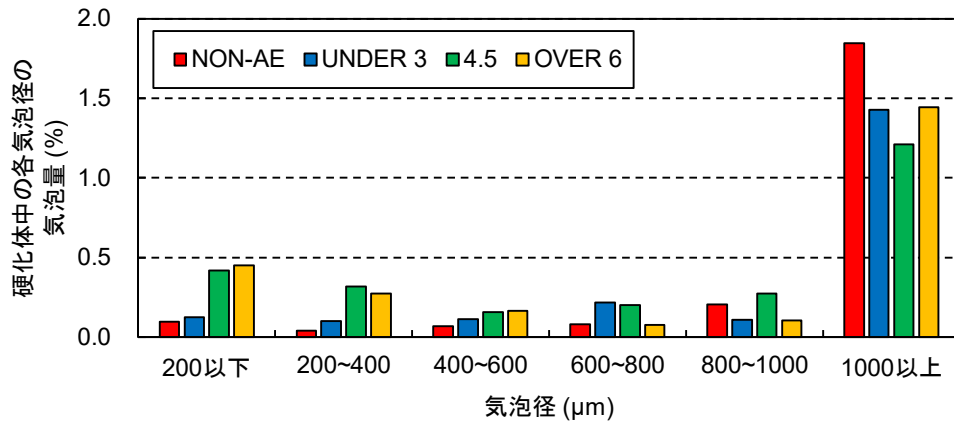


図-8 硬化体中の気泡径ごとの気泡量の分布

分浸透速度係数および表層透気係数には影響を与える結果となった。つまり、フレッシュコンクリートの空気量は、硬化体の全空隙率には影響しないが、空隙を形成している空隙径の分布が変化している可能性が考えられる。

4. 気泡径分布との関係

4.1 硬化体の気泡径分布

3章の結果から、フレッシュコンクリートの空気量は、硬化体の空隙径の分布に影響している可能性が考えられた。そこで、気泡径の分布（気泡径 3~6000μm）を、表層透気試験に用いた試験体の切断面を研磨機にて研磨したのちに、リニアトラバース法によりトラバース線上の気泡の全長を対象に測定した（以降、気泡量）。得られた3体の平均を結果として掲載した。

フレッシュコンクリートの空気量と硬化体の気泡量の関係を図-7 に示す。硬化体の気泡量でも空隙率と同様に、フレッシュコンクリートの空気量によらず同程度となった。

次に、硬化体中の気泡径ごとの硬化体の気泡量の分布を図-8 に示す。気泡径 200μm, 200~400μm の硬化体の気泡量に着目すると、AE 剤の添加量の増加に伴い大きくなるが、4.5 と OVER 6 は同程度となった。気泡径 400~600μm の硬化後の気泡量に着目すると、AE 剤の添加量の増加に伴い大きくなる傾向がある。気泡径 600~800μm および 800~1000μm の気泡量は AE 剤の添加量との対応関係が認められない結果となり、OVER 6 の添加率で気泡量が減少した。AE 剤なしでは、気泡径 800~1000μm の気泡量はそれ以下の気泡量よりも増加した。気泡径 1000μm 以上の気泡量でも AE 剤の添加量との関係性は認められず、AE 剤なしで気泡量が最大となり、UNDER 3 および OVER 6 では同程度、4.5 で最小となった。

AE 剤の添加量の増加に伴い微細な気泡は増える傾向にあるがその量は少なく、粗大な気泡の量には大きな影

響を与えていないことから、硬化体の気泡量は、フレッシュコンクリートの空気量が増加してもほとんど変化しなかったと考えられる。そのため、特定の気泡径に着目するのではなく、気泡径の分布を評価可能な気泡間隔係数に着目した。

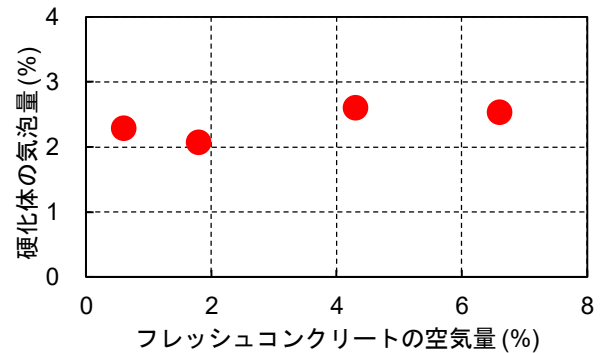


図-7 フレッシュ時の空気量と硬化体の気泡量の関係

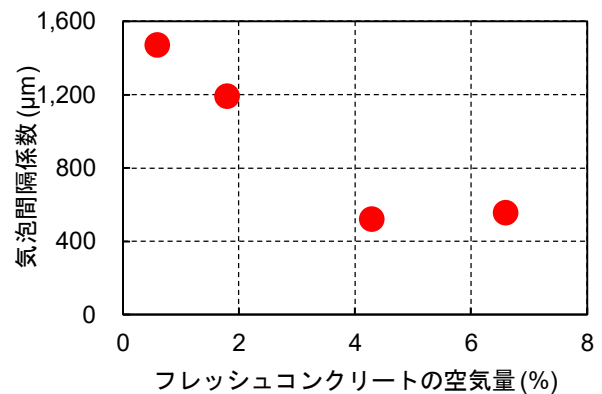


図-9 フレッシュ時の空気量と気泡間隔係数の関係

フレッシュコンクリートの空気量と気泡間隔係数の関係を図-9 に示す。フレッシュコンクリートの空気量の増加に伴い、気泡間隔係数が減少する傾向がみられるが、4.5 と OVER6 の配合では同程度となった。これは、気泡径 1000μm 以上の気泡量が OVER6 の配合で 4.5 の配合を

上回っていることが影響している。実際に、気泡間隔係数を求める上で、気泡の平均弦長が関わることから、粗大な気泡の増加に伴い気泡間隔係数も増加した結果といえる。

4.2 24 時間空隙率

気泡間隔係数と24時間空隙率の関係を図—10に示す。気泡間隔係数の増加に伴い24時間空隙率は減少する傾向となった。つまり、乾燥のしやすさには気泡の連続性が影響を及ぼすと考えられる。ただし、同程度の気泡間隔係数である配合4.5とOVER6では、24時間空隙率に差が見られた。ここで、気泡の連続性以外の要因として、図—8の気泡径1000 μm 以上の気泡量に着目した。配合OVER6では、配合4.5よりも気泡径1000 μm 以上の気泡量が多く、24時間空隙率も増加している。つまり、気泡間隔係数が同程度の時、乾燥のしやすさには大径の気泡量が影響を及ぼしていると考えられる。

これらの結果から、乾燥のしやすさには気泡の連続性が影響を及ぼすが、気泡間隔係数が同程度の場合、大径の気泡量に関わることがわかった。

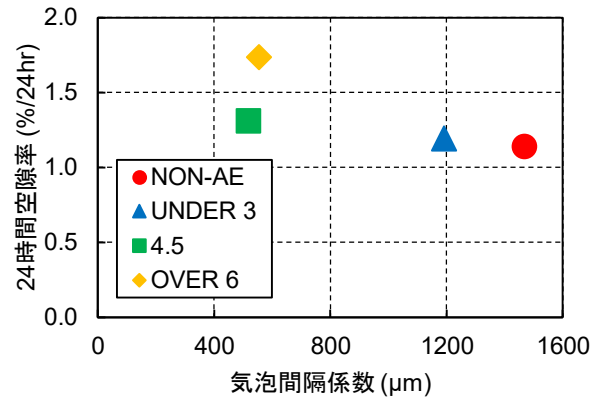
4.3 質量変化率による水分浸透速度係数

気泡間隔係数と質量変化率による水分浸透速度係数の関係を図—11に示す。気泡間隔係数の増加に伴い質量変化率による水分浸透速度係数は減少する傾向となった。つまり、水分浸透の速度には気泡の連続性が影響を及ぼすことが考えられる。ただし、同程度の気泡間隔係数である配合4.5とOVER6では、質量変化率による水分浸透速度係数に差が見られた。ここでも、24時間空隙率と同様に図—8の粗大な気泡量の影響が考えられる。配合OVER6では、配合4.5よりも気泡径1000 μm 以上の気泡量が多く、質量変化率による水分浸透速度係数も増加している。これは、気泡間隔係数が同程度の時、毛細管中に大径の気泡が存在することで、空隙構造が粗になり、吸水量が増加したと考えられる。

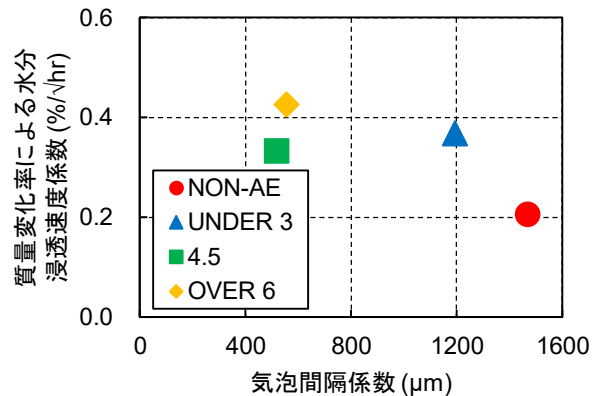
これらの結果から、水分浸透の速度は、気泡の連続性が影響を及ぼすが、気泡間隔係数に加え、大径の気泡量に関わることがわかった。

4.4 表層透気係数

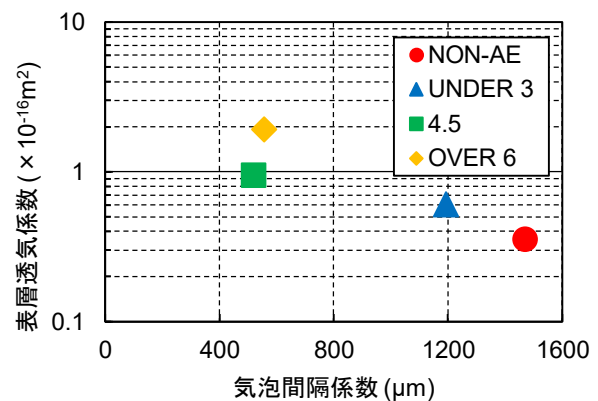
気泡間隔係数と表層透気係数の関係を図—12に示す。気泡間隔係数の増加に伴い表層透気係数は減少する傾向となった。つまり、透気性には気泡の連続性が影響を及ぼすことが考えられる。ただし、同程度の気泡間隔係数である配合4.5とOVER6では、表層透気係数に1オーダーの差が見られた。ここでも、24時間空隙率と同様に図—8の粗大な気泡量の影響が考えられる。配合OVER6では、配合4.5よりも気泡径1000 μm 以上の気泡量が多く、表層透気係数も増加している。これは、気泡間隔係数が同程度の時、透気性には大径の気泡量が影響を及ぼ



図—10 気泡間隔係数と24時間空隙率の関係



図—11 気泡間隔係数と質量変化率による水分浸透速度係数の関係



図—12 気泡間隔係数と表層透気係数の関係

すと考えられる。

これらの結果から、透気性には気泡の連続性が影響を及ぼすが、気泡間隔係数が同程度の場合、大径の気泡量に関わることがわかった。

4.5 4章のまとめ

フレッシュコンクリートの空気量の増加に伴い、気泡径600 μm 以下の気泡量は増加する傾向にあるが、それよりも大きい気泡径との対応関係は認められなかった。

フレッシュコンクリートの空気量によらず硬化体の空隙率および気泡量は変化しないが、気泡径の分布およ

び気泡間隔係数は変化した。具体的には、フレッシュコンクリートの空気量の増加に伴い、気泡間隔係数が減少する傾向となるが、空気量が4.5%程度と6%以上では同程度となった。

気泡間隔係数は、乾燥のしやすさ、質量変化率による水分浸透速度係数および透気性と対応関係がみられるが、気泡間隔係数が同程度の場合、気泡径1000 μm 以上の気泡量が関わることがわかった。

5. まとめ

フレッシュコンクリートの空気量と硬化体の空隙および物質移動抵抗性との関係を実験的に整理することを目的に、AE剤の添加量を調整してフレッシュコンクリートの空気量を変化させ、硬化体の空隙率および物質移動抵抗性を調べた。得られた知見を以下に示す。

- (1) 空気量のみを変化させた配合では、フレッシュコンクリートの空気量によらず空隙率はほぼ一定値を示すが、乾燥のしやすさ、質量変化率による水分浸透速度係数および表層透気係数には影響を及ぼす。
- (2) フレッシュコンクリートの空気量の増加に伴い、気泡径600 μm 以下の気泡量は増加する傾向にあるが、

それよりも大きい気泡径との対応関係は認められない。

- (3) フレッシュコンクリートの空気量によらず硬化体の空隙率および気泡量は変化しないが、気泡径の分布および気泡間隔係数が変化する。
- (4) 気泡間隔係数の減少に伴い乾燥しやすくなり、水分浸透の速度および表層透気係数は減少するが、気泡間隔係数が同程度の場合、気泡径1000 μm 以上の気泡量が影響する。

参考文献

- 1) 魚本健人：コンクリート構造物のマテリアルデザイン，オーム社，p.62，2007.7
- 2) 小池賢太郎，加藤佳孝，蔵重勲，上野敦，高橋駿人：コンクリートの吸水量から水分浸透深さへの変換に関する検討，土木学会第77回年次学術講演会概要集，V-465，2022.9
- 3) 高橋駿人，加藤佳孝：中性化したコンクリートの水分浸透速度係数に関する検討，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，No.22，pp.103-106，2022.10