

細孔構造との比較によるコンクリート表層性状の評価方法の検証

奥村 龍人

1. はじめに

コンクリート表層性状はRC 構造物の耐久性に大きな影響を及ぼす。建築においてはRC 造の寿命は鉄筋の腐食、すなわち鉄筋位置までの中性化によって評価される。よって、鉄筋コンクリートのかぶり厚さ分の表層性状が重要であるといえる。中性化は大気中の炭酸ガスがコンクリート内部に浸透することで進行する。炭酸ガスの浸透にはコンクリート表層の緻密性が影響しており、コンクリート表層が緻密であるほど中性化の進行は遅くなる。そこで、コンクリート表層の緻密性を測定し中性化を評価する方法として、コンクリート内部の物質移動性を測定する透気試験および吸水試験を用いることが試みられている。透気試験では炭酸ガスと同じく気体である空気の浸透、吸水試験では水の浸透を測定することでコンクリート内部の物質移動性を測っている。これらの試験方法は、非破壊においてコンクリートの表層性状を評価することができるため非常に便利な方法である。一方で、それぞれに試験の特性が異なるため、中性化との関係について議論がなされている段階である。そこで、今回はコンクリートの緻密さの指標である細孔構造と比較して、中性化の評価に透気試験および吸水試験を用いる妥当性について検証した。さらに、透気試験および吸水試験のどちらがより中性化を評価できるかについても検証した。

2. 実験概要

2.1 使用材料および調合

使用材料は表 2.2 に示すように、いずれも福岡地域で一般的に用いられる範囲のものである。コンクリートの調合は表 2.1 に示したとおりであり、水セメント比を 57%~32% の範囲で 5% おきに設定した。

表 2.1 調合

記号	スラブ/ スラブフロー (cm)	W/C (%)	呼び 強度	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				混和剤 Ad1~Ad3
					W	C	S	G1/G2	
①	18±2.5	57.0	24	46.6	182	320	804	487/483	3.84(Ad1)
②	18±2.5	52.0	27	45.2	182	350	768	495/489	4.20(Ad1)
③	21±2.0	47.0	33	50.2	175	373	853	449/446	3.66(Ad2)
④	21±2.0	42.0	40	49.1	175	417	817	449/446	4.30(Ad2)
⑤	50±7.5	37.0	52	48.6	175	473	786	441/437	6.34(Ad3)
⑥	60±10	32.0	60	47.0	175	547	732	438/432	7.88(Ad3)

2.2 試験体

本研究においては先に述べた目的のため、後述する調合条件のもとで、試験体として図 2.1 に示すような、幅 1m×奥行き 1m×高さ 1m の模擬柱部材を作成した。柱試験体の上下面には厚さ 20cm の発泡スチロール製断熱材を取り付け、打ち込みからせき板取り外し時期 (5 日) までは側面がせき板 (化粧合板) と接している状態とした。また、この柱試験体からコア抜きを行い、各試験における試験体の作成も行った。

2.2 検討項目

材齢 13 週および材齢 1 年において、図 2.2 に示した試験体側面の測定位置 6 箇所においてダブルチャンパー法による表面透気試験を行い、表層透気係数を測定した。同様に表面吸水試験を行い、吸水速度係数を測定した。各係数は 6 箇所から得られた値の平均値として求めた。

材齢 1 年において、図 2.2 に示した試験体側面のコア抜き位置から水平にコア抜きを行い、得られた 75φ×250mm のコアの表面側から 15±5mm をコンクリートカットした。これを破砕して 2.5 mm~5.0mm の粒度のモルタルを採取し、アセトン処理および真空チャンバーによる処理を行い、ポロシティ測定用の試料を作成した。この試料を用いて水銀圧入法によるポロシティの測定を行った。

また、同様にコア抜きを行い、コアの表面側から 6cm をコンクリートカットし中性化試験用の試験体を作成した。これを JIS A 1153 コンクリートの促進中性化試験方法に従って、温度 20℃、相対湿度 60%、CO₂ 濃度 5% の環境下で促進中性化試験を行い、促進材齢 1 週、4 週および 8 週に中性化深さを測定した。

表 2.2 使用材料

	記号	種類	物性等
セメント	C	普通ポルトランドセメント	密度:3.15g/cm ³
水	W	地下水	—
細骨材	S	玄界灘産海砂	表乾密度:2.57 g/cm ³
粗骨材	G1	福岡県古賀産砕石(角閃岩)	表乾密度:2.72g/cm ³
	G2	福岡県田川産砕石(石灰岩)	表乾密度:2.70g/cm ³
混和剤	Ad1	AE 減水剤	遅延形 I 種(高機能)
	Ad2	高性能 AE 減水剤	遅延形 I 種
	Ad3	高性能 AE 減水剤	遅延形 I 種(高強度用)

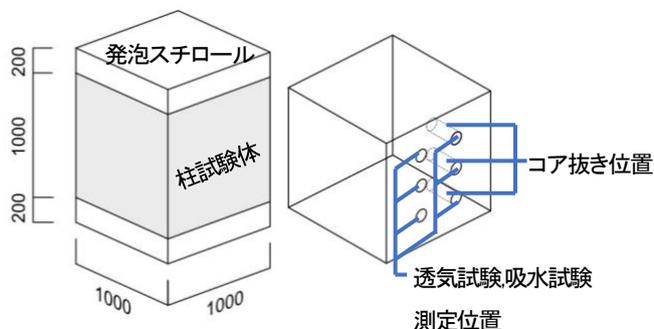


図 2.1 柱試験体 図 2.2 測定およびコア抜き位置

3. 結果および考察

3.1 透気試験

図 3.1 に透気試験の結果を示す。透気係数は材齢 13 週、材齢 1 年ともに水セメント比が小さいほど小さい値となり水セメント比が小さいほどコンクリートの表層が緻密であるといえる。しかし全ての調合において、材齢 1 年の方が材齢 13 週より大きい値となっているが、コンクリートは一般に材齢 1 年の方が材齢 13 週より緻密であるため、予想に反する結果となった。これは、材齢 13 週において透気試験の測定深さまでコンクリートが十分に乾燥しておらず、材齢 1 年においてはコンクリートが測定深さまで、十分に乾燥していたために、材齢 13 週より大きい値となったと考えられる。

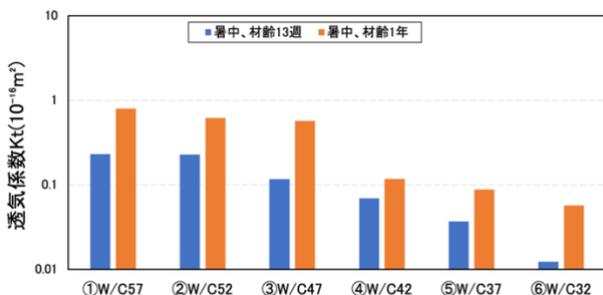


図 3.1 透気係数

3.2 吸水試験

図 3.2 に吸水試験の結果を示す。吸水速度係数も透気係数同様に水セメント比が小さいほど小さい値となった。また、w/c52 を除き全ての調合において材齢 1 年の方が材齢 13 週より小さい値となった。これは透気試験と正反対の結果であり、コンクリートの緻密さの観点から妥当な結果であると考えられる。

この結果は、吸水試験の測定深さが透気試験の測定深さと比べると浅いために、材齢 13 週において、すでに測定深さまでコンクリートが十分に乾燥していたためだと考えられる。

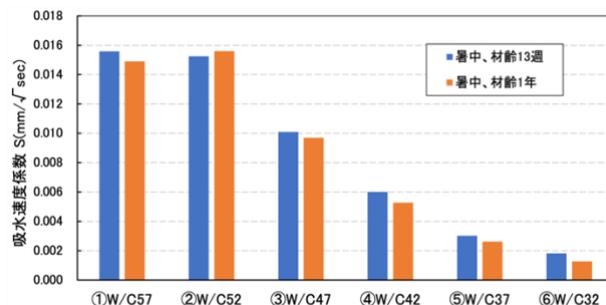


図 3.2 吸水速度係数

3.3 中性化試験

図 3.3 図 3.4 に中性化試験の結果を示す。結果はそれぞれ促進材齢 8 週について示した。中性化深さおよび中性化速度係数も上記同様に水セメント比が小さいほど小さい値となった。

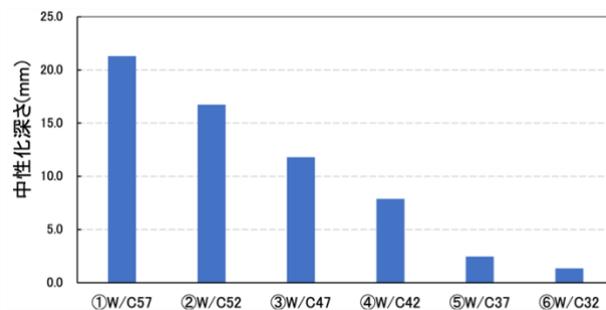


図 3.3 中性化深さ

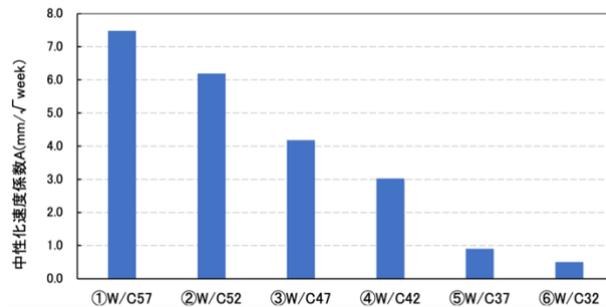


図 3.4 中性化速度係数

3.4 各係数の関係

透気係数および吸水速度係数について、それぞれ中性化速度係数との相関を調べた結果をそれぞれ図 3.5 図 3.6 に示す。透気係数および吸水速度係数ともに中性化速度係数と

の相関が見られるため、透気試験、吸水試験ともにコンクリートの中性を評価する方法として妥当であると判断できるが、吸水速度係数の方がより強い相関が見られるため、吸水試験の方がより正確に中性化を評価していると考えられる。

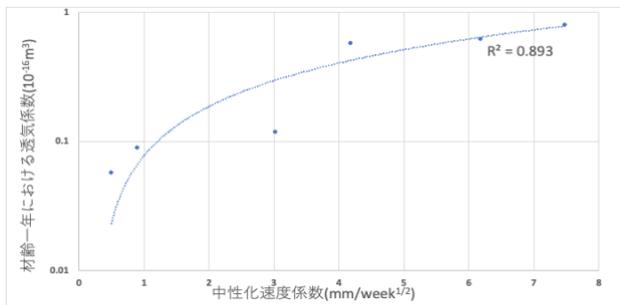


図 3.5 透気係数と中性化速度係数

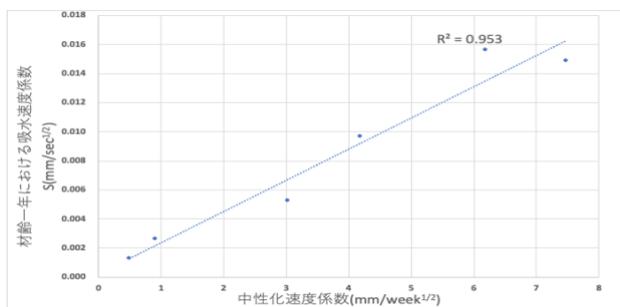


図 3.6 吸水速度係数と中性化速度係数

4. 細孔構造との比較と考察

各試験で求めた透気係数、吸水速度係数および中性化速度係数のそれぞれについて以下に示す操作を行いコンクリートの深さ 15mm におけるポロシティとの関係について検討し、各係数と最も相関が強い細孔径の範囲を求めた。

初めに、試験体の総細孔量およびコンクリート構造体の強度に影響を及ぼす 50nm 以上の細孔径の細孔量との関係を求めた。

次に 10^0 nm 以上の細孔径、 10^0 nm \sim 10^{n+1} nm の範囲の細孔径の細孔量との関係を求めた。

最後に細孔径の範囲を狭めて比較していき、最も相関が強い細孔径の範囲を求めた。

4.1 透気係数

透気係数について上記の操作過程を以下に示す。図 4.1 に示したように、透気係数と 50nm 以上の細孔量および総細孔量には相関が見られる。また、50nm 以上の細孔量の方が総細孔量より相関が強いことから、透気係数には細孔量だけではなく、細孔径も影響していることが分かる。

次に表 4.1 に示す細孔径の範囲で比較すると、細孔径が小さいほど相関が強くなることが分かり、 10^2 ~ 10^3 nm から強い相関が見られた。さらに表 4.2 に示すように細孔径の範囲を狭くすると、70~180nm の細孔径の範囲で最も強い相関が見ら

れ、最終的に図 4.4 に示す 70~240nm の細孔径の範囲で最も強い相関となった。

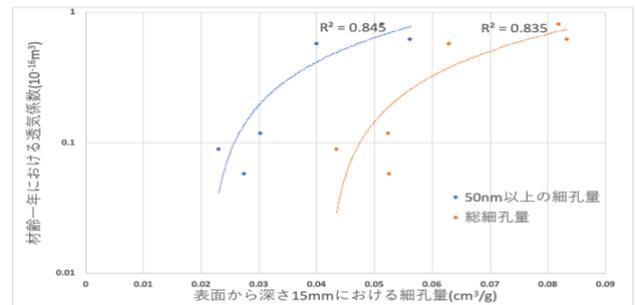


図 4.1 透気係数と 50nm 以上の細孔量および総細孔量

表 4.1 透気係数と 10^0 nm \sim 10^{n+1} nm の細孔量の関係

細孔径 (nm)	10^0 ~	10^3 ~ 10^4	10^2 ~ 10^3	10 ~ 10^2
R^2	0.171	0.231	0.836	0.901

表 4.2 透気係数と細孔径範囲の細孔量の関係

細孔径 (nm)	10~100	20~120	70~180	120~240
R^2	0.901	0.908	0.981	0.885

4.2 吸水速度係数

吸水速度係数について同様の操作過程を以下に示す。図 4.2 および表 4.3 については透気係数と同様の傾向が見られた。細孔径の範囲を狭めると、表 4.4 に示すように 20~120nm の細孔径の範囲において最も強い相関が見られ、最終的に図 4.4 に示す 20~120nm の細孔径の範囲で最も強い相関となった。

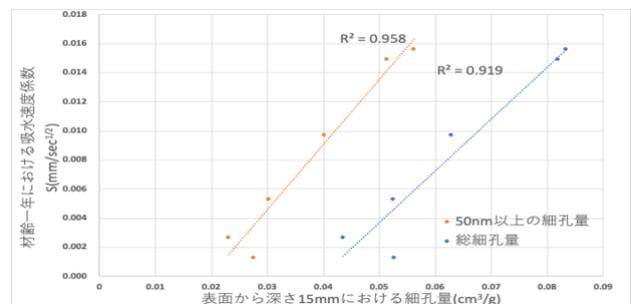


図 4.2 吸水速度係数と 50nm 以上の細孔量および総細孔量

表 4.3 吸水速度係数と 10^0 nm \sim 10^{n+1} nm の細孔量の関係

細孔径 (nm)	10^0 ~	10^3 ~ 10^4	10^2 ~ 10^3	10 ~ 10^2
R^2	0.279	0.444	0.899	0.936

表 4.4 吸水速度係数と細孔径範囲の細孔量の関係

細孔径 (nm)	10~100	20~120	70~180	120~240
R^2	0.936	0.966	0.920	0.782

4.3 中性化速度係数

中性化速度係数について同様の操作過程を以下に示す。図 4.3、表 4.5 および表 4.6 について吸水速度係数と同様の傾向が見られ、最終的に図 4.6 に示す 40~120nm の細孔径の範囲で最も強い相関となり吸水速度係数と最も相関が強い細孔径の範囲と同じとなった。

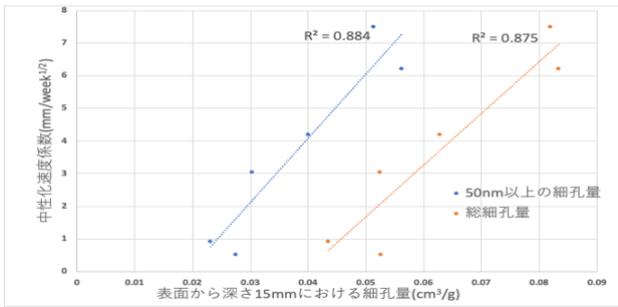


図 4.3 中性化速度係数と 50nm 以上の細孔量および総細孔量

表 4.5 中性化速度係数と 10ⁿnm~10ⁿ⁺¹nm の細孔量の関係

細孔径 (nm)	10 ¹ ~	10 ² ~10 ³	10 ³ ~10 ⁴	10 ⁴ ~10 ⁵
R ²	0.147	0.301	0.826	0.941

表 4.6 中性化速度係数と細孔径範囲の細孔量の関係

細孔径 (nm)	10-100	20-120	70-180	120-240
R ²	0.941	0.956	0.942	0.803

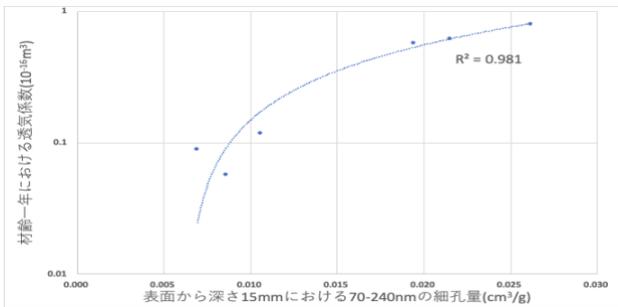


図 4.4 透気係数と 70-240nm の細孔量

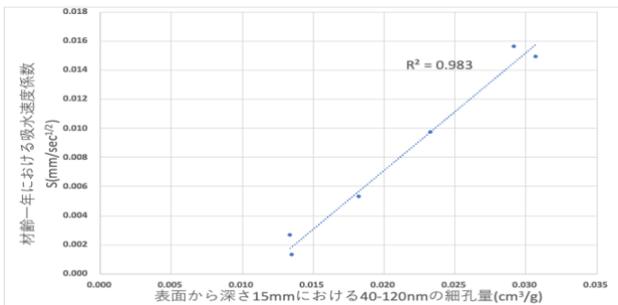


図 4.5 吸水速度係数と 40-120nm の細孔量

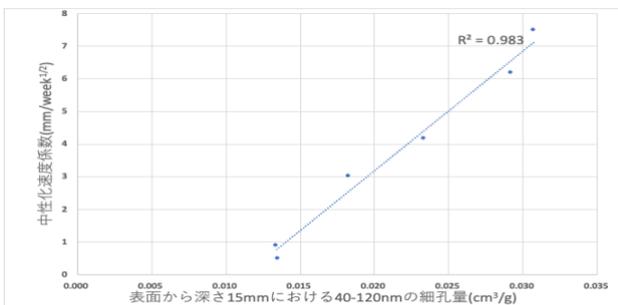


図 4.6 中性化速度係数と 40-120nm の細孔量

4.4 細孔構造との比較まとめ

透気係数, 吸水速度係数および中性化速度係数と細孔構造との比較をまとめると, 図 4.7 に示すような結果が見られる。各係数について最も相関が強い細孔径の範囲は, 透気係数が 70-240nm, 吸水速度係数と中性化速度係数は 40-120nm と同じ範囲となった。また, 図 4.8 に示すように, 上記の操

作からさらに細孔径の範囲を狭めて比較し決定係数 R² を求めた。その結果, 吸水速度係数と中性化速度係数ではどの細孔径についてもほとんど同じ程度の相関が見られた。以上のことから, 吸水試験は中性化に影響を与える細孔径について測定しており, 中性化を評価する方法として相当に妥当であると考えられる。

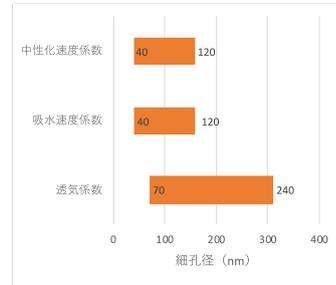


図 4.7 各係数と細孔径範囲



図 4.8 細孔径と各係数の R²

5. まとめ

今回は透気試験および吸水試験について, 細孔構造との比較を用いて, コンクリートの中性化を評価する方法としての妥当性を検証した。実験の結果から, どちらの試験方法も中性化の評価方法として妥当であると判断できた。さらに細孔構造との比較から, 吸水試験は中性化に影響を与える細孔径の細孔とおよそ同じ細孔について測定しており, 中性化を評価する方法としてかなり有効な方法であると考えられる。

今後の課題として, 今回の結果となった要因を, 各試験の測定深さや, それぞれの試験に関係する, 空気, 水および炭酸ガスの物性の観点から考察したいと思う。

6. 謝辞

本研究を進めるにあたり株式会社麻生セメントの皆様には多大な協力を頂きました。深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 白川敏夫, 盧薇迪: 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの 表面吸水試験による吸水機構の検討及び中性化の予測に関する研究 コンクリート工学年次論文集 Vol.41 No.1 pp.1733-1738, 2019.7