論文 実構造物から採取したコンクリートコア供試体における吸水性状と 細孔構造の相関性についての検討

野田 貴之*1・福山 智子*2・長谷川 拓哉*3・千歩 修*4

要旨:本研究では水銀圧入法に基づく細孔径分布の情報を簡便な室内試験である吸水試験より得られるコン クリートの吸水性状によって説明することを目標として,2 箇所の実構造物から採取したコンクリートコア 供試体において吸水試験より得られる体積含水率などの吸水性状と水銀圧入法に基づき測定した細孔径分布 から細孔半径の範囲を変動させた各区間の細孔量を算出し,両者の相関性について相関係数を用いて検討を 行った。これらの結果,吸水性状と相関性のある細孔半径及び吸水初期における吸水速度と相関性のある細 孔半径がそれぞれ明らかになった。

キーワード:コンクリート,吸水試験,細孔構造,相関係数

1. はじめに

コンクリートの劣化現象は細孔内の水分,イオンの移 動や細孔構造自体が関わっている。多孔質体の吸水現象 は、毛細管による吸引圧やゲル細孔による蒸気相水分の 吸着現象など細孔構造との関連性があるとされる¹⁾。同 時に吸水性状と細孔構造の関連性も示唆されている²⁾。

既往の研究³⁾⁻⁸⁾では, モルタル, コンクリート供試体の 吸水性状により単位ペースト量, 水セメント比などの調 合推定や圧縮強度及び中性化速度の推定が可能であると いった研究があり, 既往の研究^{9),10}においては吸水試験 より得られる吸水性状及び水銀圧入法に基づく細孔径分 布の測定結果より得られる総細孔量を吸水現象が顕著な セメントペースト部分による補正を行った有効吸水量, 総有効細孔量を用いてコンクリートコアの水セメント比 及び圧縮強度の推定が行われている。

本研究では細孔構造の測定は水銀圧入法に基づくが, これは細孔構造を円筒径とする仮定や試料の乾燥法につ いて問題が指摘されている¹¹⁻¹³。それに対し,水銀圧入 過程の熱力学的検討によるモデルレス法の研究¹¹⁾や微細 ひび割れや水和物の変質を起こすと指摘されている乾燥 方法に対して影響の少ない乾燥方法の研究¹²⁾,インクボ トル細孔や細孔の連続性の測定の研究がある¹³⁾。

以上のように既往の研究から、コンクリートの吸水性 状は調合や圧縮強度、中性化速度といった細孔構造とも 密接に関連する指標の推定に用いられ実際に相関が得ら れている。つまり吸水性状から直接的に細孔構造を推定 できる可能性があると考えられる。

本研究ではコンクリートの吸水性状を測る試験の簡 便な室内試験法としての吸水試験,細孔構造に関する試 験である水銀圧入法による試験を実施した。しかし本研 究においては上記の水銀圧入法の問題点が改善できてな いため測定結果は完全に正確な値ではないが細孔径分布 の概要を把握することを趣旨として採用することとする。

本研究の位置付けは簡便な試験法である吸水試験か ら得られる吸水性状によってコンクリートの細孔構造を 推定するための基礎研究であり、そのため異なる2箇所 の実構造物から採取したコンクリートコア供試体に対し て測定した種々の吸水性状と水銀圧入法による細孔量と の相関性を検討した。

2. 実験の概要

2.1 供試体の諸元

表-1 に供試体を採取した各建物の概要を示す。66 号 棟及び68 号棟は長崎県にある端島(軍艦島)に存在する建 物であり(図-1),札幌市にある某体育館(以下,体育館)は 北海道に存在していた建物である(図-2)。コンクリート コア(以下,コア)の採取はすべて 2013 年に行った。

外観変状に関して、いずれの建物においても鉄筋腐食 による仕上の剥離・剥落、かぶりコンクリートの浮きが 部分的に見られた。中性化の進行は 68 号棟、体育館には ほとんど確認されず、66 号棟では内壁側が顕著であり、 内壁面から最大で約 35mm の中性化深さが確認された。

採取したコアは直径約100mm×高さ約200mmであり, 各コアを約20mm厚でカットしたもの(以下,供試体)を 試験に用いた。

表-1 建物概要

建物名	竣工年	規模	構造	用途	
66 号棟	1940 年	地上4階 地下1階	RC	住居 浴場 倉庫	
68 号棟	1950年	地上2階	RC	病院	
札幌市 某体育館	1970年	地上3階	RC	体育館	

*1 北海道大学 大学院工学院空間性能システム専攻 大学院生 (学生会員) *2 北海道大学 大学院工学研究院空間性能システム部門 助教 博士(工学)(正会員) *3 北海道大学 大学院工学研究院空間性能システム部門 准教授 博士(工学)(正会員) *4 北海道大学 大学院工学研究院空間性能システム部門 教授 工学博士(正会員) 情報整理のため相関性の検討に用いた供試体をコア ごとにまとめると、66号棟からは16体の供試体、68号 棟からは11体の供試体、札幌市の某体育館の南東外壁面 から採取したコアからは12体の供試体、同じく南西外 壁面からは7体の供試体を用いた。

2.2 吸水性状の測定

吸水試験は前処理として各供試体を 85℃の乾燥機中 で質量変化が恒量になるまで(絶乾状態と見なす)乾燥さ せた後,外壁面側の一面を吸水面として開放し,残りの 面はアルミテープによってシーリング処理した。その後, アルミ製の容器に各供試体の下面 10mm が浸るように吸 水試験を行った。吸水試験の期間は試験開始から 0,10, 20,30,60,90,120,150,180,240,300,420,540, 720,1080,1440,2160,2880,3600,4320,5760,7200, 8640,10080 分毎に7日間測定した。試験中は各測定時 間において各供試体を取り出し,湿布によって表面水を 軽く除去した後に計量を行うものとした。

試験終了後,各供試体をその細孔構造の変化を防ぐた め50℃の炉中で絶乾状態にした後,真空ポンプを用いて、 負圧下に置いた各供試体に微細な気泡を抜くため沸騰さ せ常温に戻した水を24時間吸水させた後に取り出し、 再び恒量になるまで水中浸漬させ,各供試体の水中質量 と気中質量を計量した。

吸水試験より得られたデータから吸水性状を把握する ための指標値として以下の計算式に基づき値を算出した。

$$a_{max} = \frac{W_{max} - W_0}{W_0} \times 100 \tag{1}$$

(2) 最大体積含水率 U_{max} (%)

$$U_{max} = \frac{W_{max} - W_0}{W_{max} - W_w} \times 100 \tag{2}$$

(3) 初期吸水速度⁸⁾ V₀ (%/min^{1/2})

(1) 最大吸水率 a_{max} (%)

$$V_0 = \frac{\alpha + \gamma}{\beta} \tag{3}$$

(4) 初期吸水速度 V_{0R} (%/min^{1/2})

$$V_{0R} = \frac{a_{nk} - a_0}{T_{nk}} \tag{4}$$

(5) 吸水速度比 R

$$R = \frac{E_2}{E_1}$$
(5)

(6) 吸水速度 V_t(%/min^{1/2})

$$V_t = \frac{a_t - a_{t-1}}{T_t - T_{t-1}} \tag{6}$$

ここで、 W_{max} :気中質量の最大値 (g)、 W_0 :絶乾質量 (85°Cによる)(g)、 W_w :水中質量 (g)、 $\alpha + \gamma$: a_{max} と同義 ⁸⁾(%)、 β :吸水率が $\frac{\alpha}{2} + \gamma$ の値に到達するまでの時間 (min^{1/2}), a_{nk} : Nick Point の吸水率 (%), a_0 : 試験開始時 の吸水率 (%), T_{nk} : Nick Point の時間(min^{1/2}), E_1 : 図-3 の初期勾配, E_2 : 図-3 の二次勾配, a_t : ある測定時間の 吸水率 (%), a_{t-1} : a_t より一つ前の測定時間の吸水率 (%), T_t : ある測定時間 (min^{1/2}), T_{t-1} : T_t の一つ前の測定時間 (min^{1/2})

ここで,式(4)と式(5)について図-3 に示す吸水時間の 平方根と供試体の吸水率の関係を表す概念図を用いて説 明する。Nick-Point とは RILEM CDC3 に規定され,図-3 の丸印をつけた点であり,二つの交差する直線の線形回 帰によって求めることができる。その点における吸水率 と時間の平方根がそれぞれa_{nk}及びT_{nk}である。また図-3 に示すように時間の平方根を横軸に設定すると吸水率と の関係はバイリニアで表せる。吸水速度比とはその2つ の直線における二次勾配と初期勾配の比によって表すこ とができる。算定原理の異なる2つの初期吸水速度を用 いた理由はメカニズムの異なる各指標が細孔量との相関 性を検討する上でどちらが有効かを検討するためである。

また,吸水試験の前処理として本研究においては85℃ において乾燥処理を施したため微細ひび割れの発生によ る細孔構造の変化が懸念されるが、吸水試験開始以降の 乾燥処理は別途試験において細孔構造の変化が確認され なかった温度 50℃としたため温度変化による細孔構造 の変化は少ないと考えられ、吸水試験時の細孔構造との 関係を検討する上では妥当な手段と考えられる。



図-1 66 号棟及び 68 号棟の配置図^{14)に加筆}



2.3 細孔径分布の測定

本測定は JIS R 1655 に準拠して行った。本測定におけ る供試体は吸水試験終了後の供試体を約 5mm 角に破砕 した後 24 時間アセトンに浸漬し,細孔内の水分を除去 し水和反応を止めた後に 50℃乾燥させたものを水銀圧 入ポロシメータにより測定を行った。測定は各試料に対 して低圧測定部(0~345kPa)及び高圧測定部(大気圧~ 228MPa)を1回ずつ行った。測定可能な細孔径の範囲は 前者が 360000m~3600nm であり,後者は 6000nm~5nm である。本研究では測定の結果,測定可能とされている 5nm よりも小さい径についても測定されているが,それ らは参考値として以降の各図にて示す。

本測定における試料はセメントペーストからなってい るため得られる細孔分布特性には骨材(特に粗骨材)の情 報が含まれていない。そのため吸水試験より得られる各 種吸水性状には骨材の影響が本研究においては除外でき ていないため、その影響は今後の課題として検討する。

3. 実験結果及び考察

3.1 吸水性状と区間細孔量の相関性

初めに、コアごとの基礎性状として個別の試験結果を **表-2**に示す。表の値は供試体の平均値である。

また各吸水性状の指標値及び細孔径分布の測定結果に おいて、細孔半径の下限値と上限値を設定し、その区間 内における細孔量との相関性を検討した。これによって 各吸水性状がどの細孔径の影響を受けるかを検討するこ とができると考えられる。なお、相関性の検討には既往 の研究¹⁵⁾を参考として相関係数を用いて行った。相関性 の結果を図-4~8 に示す。凡例には細孔半径の上限値が 示されてあり、プロットされているデータによって上限 値を固定し横軸上において下限値を振った際の相関係数 の変動を検討することが出来る。各図では一般的に中程 度の相関があると言われている相関係数の絶対値が 0.4 より大きい値を持つデータのみ選定して示した。また、 図-4, 6, 7, 8のデータは2か所の建物全ての供試体に 対して示してあるが図-5 は表-2 に見られるように札幌 市某体育館のみの結果を示す。

表-2 コア	ごとの	基礎性状
--------	-----	------

	66 号棟	68 号棟	SE	SW
最大吸水率(%)	5.60	5.55	6.90	7.27
最大体積含水率(%)	-	-	11.07	11.40
初期吸水速度V ₀ (%/min ^{1/2})	0.36	0.16	0.98	1.21
初期吸水速度V _{0R} (%/min ^{1/2})	0.54	0.38	3.30	3.86
総細孔量(ml/g)	0.11	0.11	0.08	0.08



図-6 初期吸水速度V₀と区間細孔量の相関性

結果として、先に述べた中程度の相関があると判断さ

れたのは図-4~8 より最大吸水率では 1.5nm から 298nm の区間細孔量に関して相関係数が約-0.6 と負の相関性を 示し,最大体積含水率では相関係数が約 0.5 で 11410nm から 14000nm の区間細孔量に関して,初期吸水速度V₀で は相関係数が約 0.5 で 365nm から 3000nm での区間細孔 量に関して正の相関性を示した。また初期吸水速度V_{0R} では相関係数が約-0.7 で 1.5nm から 12nm の区間細孔量 に関して,吸水速度比では相関係数が約-0.5 で 2.2nm か ら 1629nm との区間細孔量に関して負の相関性を示した。

相関性の結果に関して有意性を判定するため図-4~8 のように全ての供試体をまとめた相関性の検討を行うの ではなく、供試体を建物ごとに分け、各建物において相 関性が中程度以上あるかどうか、また正負の一致を検討 した。検討方法は図-4~8 に楕円で示した区間細孔量と 各吸水性状の相関係数が最も大きい値を示した区間細孔 量と各吸水性状に関する建物ごとの散布図を作成し相関 係数を検討するとともにその範囲における母相関係数が 0 であるかどうかという無相関の検定を実施した。

結果として最大吸水率及び初期吸水速度 V_{0R} は建物ご とについて相関係数を算出すると低い値となり、無相関 検定によって母相関係数が0であるとの結果となったた め、それらの相関性は有意な結果ではないと判断された。

一方で,最大体積含水率,初期吸水速度V₀,吸水速度 比に関しては建物ごとについて算出した相関係数値の正 負も一致しており,その大きさも相関があると判断でき るものであった。それに加えて最大体積含水率及び初期 吸水速度V₀は有意確率 5%のもとで母相関係数は 0 では ないと判断され,吸水速度比においては有意確率 1%の もとで母相関係数は 0 ではないと判断された。ゆえに上 述の3 つの吸水性状と区間細孔量との相関性は有意であ ると確認された。ここで,同様な尺度の最大吸水率と最 大体積含水率に関して相関の差異が認められたことにつ いてだが,最大体積含水率とは異なり最大吸水率は供試 体中の細孔容積を直接評価できる指標ではないために差 異が認められたと考えられる。

以下,相関性が認められた最大体積含水率,初期吸水 速度V₀,吸水速度比の3つの吸水性状と区間細孔量の相 関性について,それらのメカニズムから考察を行う。代 表例として3つの吸水性状と区間細孔量との相関係数が 最も大きかった区間における吸水性状と区間細孔量の直 接的関係性を図-9~11 に示す。図-9 より,最大体積含 水率は区間細孔量と正の相関性があり,これは最大体積 含水率が吸水速度と比べ細孔径による毛管力ではなく細 孔の容積に直接関係すると考えられるため最大体積含水 率から 11410nm から 14000nm といった大径の細孔容積 との相関性を検討できる可能性を示すと考えられる。



3

初期吸水速度V₀(%)

区間細孔量と初期吸水速度V0の関係



579

0.01

0 L

図-10



なお,縦軸の値は微量であるがポロシメータの圧入量 分解能は 0.1mm³ であるため分解能の範囲に収まってお り有効な値であると考えられる。

図-10より、初期吸水速度 V_0 も正の相関性があり、式 (3)から 579nm から 715nm という毛細管径の細孔量が増 えれば、毛管力により毛管水の上昇が顕著になり最大吸 水率の半分の値に達する時間も短くなり、また細孔量増 加により水分容量としても増加することから初期吸水速 度 V_0 も大きな値を示したと考えられる。

最後に図-11 から吸水速度比は区間細孔量と負の相関 性を示した。これは 3.3nm から 715nm の細孔量が減少す ればその径による毛管力の寄与分が減少するので初期吸 水速度が小さくなる。また二次勾配では水蒸気拡散や吸 着水の膜厚差による駆動力の勢力が大きくなるため、毛 管力による寄与分の影響は小さいと考えられ二次勾配の 変動は少ないと考えられるために二次勾配が大きくなる と考えられる。

3.2 吸水速度と区間細孔量の相関性

図-3 にてバイリニアで表された 2 つの直線の初期の 期間 A:0 分から 10 分,後期の期間 B:720 分から 1080 分の各吸水速度と区間細孔量の相関性について全ての供 試体に関する検討結果をそれぞれ図-12,13 に示す。上 記の期間は全ての供試体に関して同様の図を作成し、期 間 A と B が初期,後期にそれぞれ属することを確認して いる。吸水速度とは式(6)により算定され,吸水試験時に おいて連続する測定点間の吸水率をその測定点間の時間 (min^{1/2})で除した値である。期間 A,B と分けて区間細孔 量との相関性を検討することにより期間毎の吸水現象が どの細孔に依存するかについて検討を試みた。

図-12, 13 は図-4~8 と同様の見方であり, 各データ が区間細孔半径の上限値を示し, 水平軸は細孔半径の下 限値を, 縦軸は各区間細孔量と各吸水速度との相関係数 を示す。一つの曲線に着目した場合, 水平軸で値を振る ことにより区間細孔半径の上限値を固定したまま下限値 を変えていることとなり, 曲線上の点において, その区



図-12 区間細孔量と吸水速度(期間 A)の相関性



間における細孔量と吸水速度の相関係数を確認できる。

期間 A においては、1.7nm から 185000nm の総細孔量 及び 715nm から 185000nm における区間細孔量において 相関係数が約 0.6~0.7 といった中程度から強い正の相関 性が確認された。供試体を水に浸した場合、初期の吸水 現象は毛管現象によることから上述の径において毛管に よる吸水が活発であることが推察される。後期の吸水を 示す期間 B では傾向が逆転した。ほとんどの区間におい て、その細孔量と吸水速度は負の相関性を示しており、 その傾向は期間 A と真逆とも言える。しかしながら、細 孔量の増加によって吸水速度が減少することは考えにく い。供試体の一面が大気に開放され、乾燥を受けやすい 径による水分逸散速度が吸水速度を超える条件ならば考 えられるが、今回、吸水面以外はシーリングされている。

既往の研究において,吸水現象は高含水率領域におい ては毛管水移動,低含水率領域においては水蒸気拡散が 主である¹⁰とされ,また大径の細孔が増加すれば透湿率 は大きくなり,小径になるほど毛管力は増加するが,管 壁からの摩擦抗力が増加するため水分移動は抑えられる ¹⁷とされている。以上より,細孔量が大きいと体積が大 きくなるために拡散した水分子が管壁に衝突する確率が 低くなるために管壁からの引力を受けにくく吸着が生じ にくくなると考えられる。吸着過程において吸着水膜が 形成されると、その膜厚差を解消するように毛管水は移動する、ゆえに細孔量が大きいと吸着が起きにくいとい う考えから水分移動の駆動力が発生し難い状況になり吸 水速度が減少すると考えられる。しかし、現段階では推 察であるため、今後更なる検討を要する。

4. まとめ

実構造物から採取したコンクリートコアの吸水性状と 細孔構造の相関性についての検討結果を下記に示す。 (1) コンクリートの吸水試験より得られる最大体積含水 率,初期吸水速度,吸水速度比と,各細孔径区間で積算 した細孔量(区間細孔量)の間において中程度から強い有 意な正の相関性が確認された。

(2)最大体積含水率は11410nmから14000nmの径の細孔 量と相関性から最大体積含水率では細孔構造の中でも大 径の細孔容積との相関が検討できる可能性を示した。
(3)初期吸水速度,吸水速度比といったその駆動力が毛 管張力によるものでは前者が579nmから715nm,後者が 3.3nmから715nmといった比較的小径の毛細管による細 孔量との相関を示したことから吸水速度による毛細管径の細孔容積との相関が検討できる可能性を示した。
(4)吸水初期の吸水速度と相関のある区間細孔量を捉えることが出来たが,以降の吸水速度では負の相関となり、 これの理論的なメカニズムの考察は更なる検討を要する。

謝辞:本研究は,長崎市の特別許可,JSPS 科研費若手研 究(B)24760446 の助成により軍艦島調査が実施でき,吸 水試験及び水銀圧入装置の使用やご指導は東京大学の野 口研究室及び東京理科大学の兼松研究室の皆様にご助力 頂きました。また,日本建築学会北海道支部材料施工専 門委員会の活動の一部として札幌市の某体育館調査が実 施できました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 中野宗太,多田真作:気泡コンクリートの水分と性質(1),日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿), pp.87-88,1980.9
- 2) 中野昌宏ほか:中性子ラジオグラフィを用いた下面からの吸水による建材中の水分挙動の観測,日本建築学会大会学術講演梗概集(東海),pp.369-370,2012.9
- 秋山良,中田善久,清水五郎:コンクリートの吸水 性状に基づく中性化深さの予測に関する研究,2011 年度日本建築学会関東支部研究報告集 1, pp.133-136, 2012.3
- 清水五郎:吸水試験に基づくコンクリートの品質判 定に関する研究,コンクリート工学年次論文報告集,

Vol.18, No.1, pp.579-584, 1996

- 5) 河辺京,許永東,清水五郎:コンクリートの吸水性 状に基づく品質の評価に関する実験的研究 その1. コンクリートの吸水試験方法,日本建築学会大会学 術講演梗概集(東北), pp.819-820, 2000.9
- 6) 許永東,河辺京,清水五郎:コンクリートの吸水性 状に基づく品質の評価に関する実験的研究 その2. コンクリートの調合・強度の推定,日本建築学会大 会学術講演梗概集(東北),pp.821-822, 2000.9
- 7) 熊本直輝ほか:吸水速度に基づく高強度コンクリートの調合・強度の推定に関する研究,2007年度日本 建築学会関東支部研究報告集,pp.69-72
- 許永東,清水五郎:吸水率—時間曲線に基づくコン クリートの品質評価に関する実験的研究,日本建築 学会構造系論文集, No.566, pp.1-6, 2003.4
- 9) 吉野進也ほか:有効吸水量に基づくコンクリートコアの水セメント比,圧縮強度推定方法,日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道),pp.201-202,2004.8
- 10) 佐々木隆ほか:有効吸水量,総有効細孔量に基づく コンクリートコアの水セメント比,圧縮強度推定方 法,シンポジウム コンクリート構造物への非破壊 検査の展開論文集, Vol.2, pp.49-54, 2006.8
- 内海秀幸,多田眞作:硬化セメントペーストへの水 銀圧入の熱力学,コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.501-506, 2002
- 12) 伊藤義也ほか:セメント硬化体中のエトリンガイト を変質させない条件によるフリーズドライとそれ による細孔径分布,材料, Vol. 59, No.2, pp.131-136, 2010.2
- 13) 吉田亮, 岸利治:水セメント比および養生が異なる セメントペーストにおける水銀圧入過程の相違に 関する研究,コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, 2007
- 14) 株式会社ユニバーサルワーカーズ 軍艦島コンシェルジュ:軍艦島コンシェルジュ 軍艦島について, http://www.gunkanjima-concierge.com/about/index.html, 訪問日 2013.8
- 15) 鎌田英治ほか:コンクリートの耐凍害性におよぼす 細孔構造の役割についての統計的解析,日本建築学 会構造系論文集,No.487, pp.1-9, 1996.9
- 16) 秋田宏,藤原忠司,平井和喜:毛管作用に基づいた モルタル中の水分移動解析,セメント・コンクリー ト論文集, Vol.51, pp.624-629, 1997
- 17) 沼尾達弥,福澤公夫,早川隆之:セメント硬化体の 水分移動と乾燥収縮に及ぼす配合要因の影響,セメ ント・コンクリート論文集, Vol.51, pp.618-623, 1997