

論文 含水状態を考慮した構造体かぶりコンクリートの透気性評価

水上 翔太*1・早川 健司*2・加藤 佳孝*3・勝木 太*4

要旨: 本研究は含水状態が表層透気性に及ぼす影響に着目し、空隙の緻密さが乾燥および表層透気性の増加に及ぼす影響について、W/Cを変動させた供試体を用い検討を行った。また、寸法および環境条件の影響が、材齢の経過に伴う透気係数の変化にどの程度の影響を及ぼすのか検討した。その結果、水分逸散時の含水状態の変化が透気係数の増加割合に及ぼす影響はW/Cによらず一定であることを確認した。また、寸法条件の影響は室内環境において概ね56日以降は収束する傾向を確認した。最後に、本研究で得られた知見をもとに、竣工検査において、材齢や降雨の影響を適切に考慮した表層透気性の評価方法に関する一提案を行った。

キーワード: かぶりコンクリート, 表層透気性, 含水状態, 環境条件, 竣工検査

1. はじめに

構造体コンクリートの耐久性はかぶりコンクリートの品質と密接に関連しており、使用材料や配合、複数の施工プロセスによる影響を大きく受ける。すなわち、構造体コンクリートの耐久性の確保には、このプロセス管理に拠るところが大きいものの、施工後の品質の確認は圧縮強度とひび割れ以外では定量的な評価が行われておらず、構造物の品質を評価できていないとの指摘がある(例えば1)。したがって、耐久性を原位置にて評価できる手法およびそれらを用いた検査システムの確立が求められている。

近年、かぶりコンクリートの透気性を原位置で検査する手法(例えば2,3)が着目されており、中性化や塩害劣化等をはじめとする耐久性指標との相関性が確認されている。コンクリートの表層透気性は、含水状態の影響を受けることが一般的に知られており、Jacobsら⁴⁾によってこれらの影響が検討されているものの、未だ十分な知見を得るに至っていないのが現状である。検査手法として確立するためには、含水状態の影響を定量的に把握した上で、適切に考慮した評価方法の検討が必要である。ここで、材齢の経過に伴う水分の逸散が表層透気性に及ぼす影響に関する検討⁵⁾は報告されているが、部材寸法、環境条件の違いの影響を把握した例は少ない。また、表層透気試験が測定対象とするコンクリートの深さは、計算によって概略値を得ることが出来るが、実際の測定深さに関する検討を行った例は少ない。

そこで、表層透気試験方法の基礎情報を得るために、W/Cおよび含水状態を変化させたコンクリート供試体を用いて、測定深さに関する検討を行った。次に、含水状態が表層透気性に及ぼす影響を把握するために、空隙構造および水分の逸散状態が表層透気性に及ぼす影響

表-1 示方配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						
		W	C	S	G	AE	AE 減	SP
30	41.5	178	593	628	903	-	-	0.07
50	45.5	178	356	777	949	0.01	0.89	-
70	49.5	180	257	882	918	0.02	0.64	-

表-2 物性値

W/C (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	圧縮強度 (N/mm ²)	中性化深さ (mm)
30	22.0	5.5	91.1	0
50	12.5	6.5	39.6	4.7
70	12.0	7.2	23.1	13.6

※中性化深さ: 20℃60%R.H. CO₂ 5%, 28 日間

について実験的に検討した。さらに、部材の厚さを変化させた供試体を各環境条件下に曝露し、各材齢における表層透気性への影響を確認した。

以上の検討により得られた知見をもとに、竣工検査において表層透気試験を適用することを想定し、含水状態の影響を考慮した評価方法について考察した。

2. 含水状態が表層透気性に及ぼす影響

2.1 含水状態が表層透気試験の測定深さに及ぼす影響

含水状態の変化に伴う透気係数の変化は、同時に、透気試験の影響範囲として、測定深さにも影響を及ぼすと考えられ、かぶりコンクリートの品質を評価するためには、測定深さも合わせて理解することが重要である。そこで、W/Cと含水状態が、測定深さに及ぼす影響を、ドリル削孔による方法を用いて把握することとした。

*1 芝浦工業大学大学院 工学研究科 建設工学専攻 (正会員)

*2 東急建設(株) 土木技術部 博(工) (正会員)

*3 東京大学 生産技術研究所 准教授 博(工) (正会員)

*4 芝浦工業大学 工学部 土木工学科 教授 工博 (正会員)

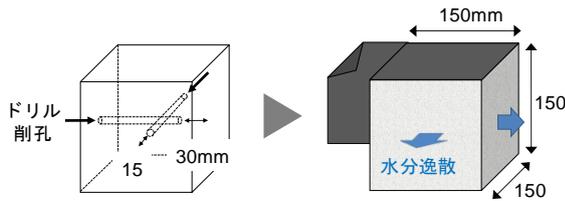


図-1 供試体の作製方法

(1) 供試体作製と実験方法

表-1 に示す配合を用い、一辺 150mm の立方体のコンクリート供試体を作製した。打設翌日に脱型した後、水和反応の進行に伴う空隙構造の変化が透気性に及ぼす影響を排除するために、60℃の温水環境中で 28 日間養生した。

次に、測定深さを把握することを目的として、図-1 に示すようにドリル削孔 (φ 6mm) を行い、測定面から孔先端の距離を 15, 30mm および無削孔の供試体をそれぞれ作製した。測定深さの把握方法については(2)で後述する。開口部からの水分の逸散を防ぐために、削孔口表面部をシリコンでコーティングし、測定面となる 2 面以外をアルミテープでシールした。その後、再び水中浸漬 (20℃) を行い、質量が概ね一定となったことを確認した。なお、直径 6mm の空洞を供試体が有することで、乾燥に及ぼす影響の有無を確認するため、無削孔供試体と削孔処理した供試体の質量変化ならびに高周波容量式の含水率測定結果を比較し、概ね同じことを確認した。また、併せて採取、養生した円柱供試体 (φ 100mm×高さ 200mm) を用いた圧縮強度試験および中性化促進試験の結果を表-2 に示している。

乾燥開始 3 日間は実験室内 (20℃, 40%R.H.) に静置した。その後、引き続き室内にて乾燥させた室内乾燥と、任意の期間炉乾燥器内 (50℃) に供試体を入れた後、取出して室内にて 24 時間程度静置させた後に測定を行う促進乾燥の 2 条件とした。

試験項目は、表層透気試験と高周波容量式による含水率測定および質量測定とした。表層透気試験は、ダブルチャンバー方式の TORRENT 法²⁾を用いた。本試験方法は、真空ポンプを用いたチャンバーの吸引によってチャンバー内部を設定値 (30hPa) まで減圧し、その後内部の気圧が復圧していく過程から、透気係数 $K T$ を式(1)により求める。併せて、測定深さは式(2)によって求めることができる。

$$KT = \left(\frac{V_c}{A} \right)^2 \frac{\mu}{2\varepsilon P_a} \left[\frac{\ln(P_a + \Delta P \tau / P_a - \Delta P \tau)}{\sqrt{t} - \sqrt{t_0}} \right]^2 \quad (1)$$

$$L = 1000 \times \left[\frac{2KT P_a t}{\varepsilon \mu} \right]^{1/2} \quad (2)$$

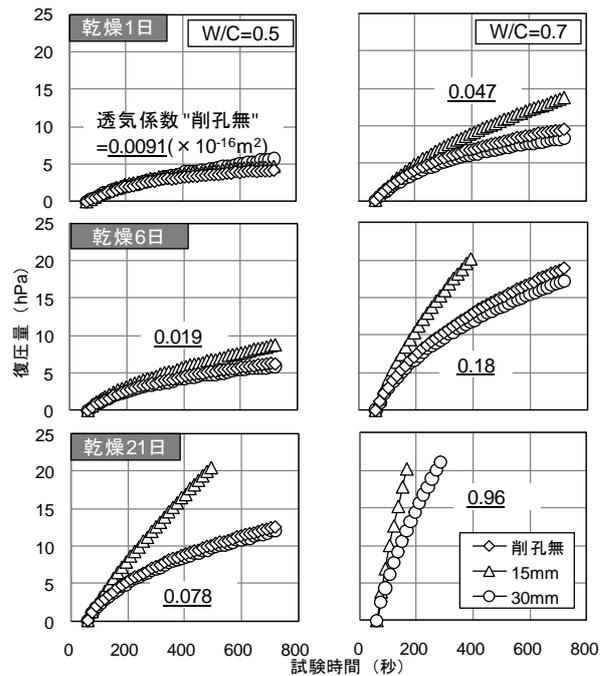


図-2 復圧量と試験時間の関係

ここに、 KT : 空気透過度係数(m^2), VC : 内部チャンバーの容積(m^3), A : 内部チャンバーの面積(mm^2), μ : 空気の粘性係数($=2.0 \cdot 10^{-5} N \cdot s/m^2$), ε : かぶりの予想多孔性($=0.15$), P_a : 大気圧(N/m^2), ΔP : 試験終了までの復圧量(N/m^2), t : 試験終了時間(s), t_0 : 試験開始時間($=60s$)
 L : 測定深さ(mm)

(2) 実験結果と考察

測定深さの把握の仕方として、復圧時のコンクリート中の気圧変化は、表層部分から徐々に深い範囲に影響を及ぼしていくと考えられるため、試験時間の増加に伴い、徐々に復圧し、その影響が孔先端部に達した時点で復圧速度が増加すると考えられる。

図-2 に各 W/C, 乾燥期間における、復圧量と試験時間の関係の一例を示す。それぞれの曲線は、無削孔供試体と、測定面から孔先端までの距離が 15mm と 30mm となっている測定面の復圧過程を表している。

結果全体の傾向として、乾燥期間の増加に伴い復圧曲線の傾き、すなわち透気係数が増加する傾向を確認した。

ここで W/C=0.7 の深さ 15mm に設定した面の復圧曲線に着目すると、乾燥 1 日目の試験時間が約 200 秒付近から、傾きが他に比べて大きくなり、試験途中から復圧量が増えることがわかる。一方、深さ 30mm に設定した面の復圧量は、無削孔供試体と変わらないため、この時の測定深さは 15mm 以上 30mm 未満と推察することができる。また、これらの変化が確認できない W/C=0.5, 乾燥 1 日目の場合には、測定深さは 0mm 以上 15mm 未満であ

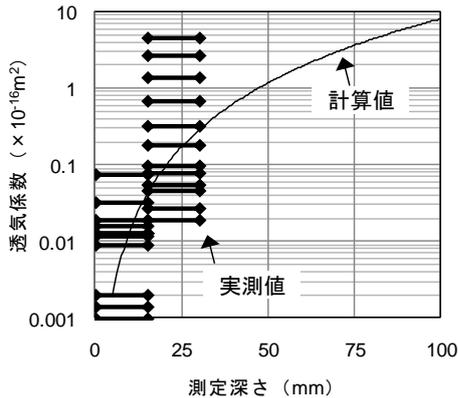


図-3 透気係数と測定深さ（計算値および実測値）の関係

ると推察される。

本実験では、各 W/C、乾燥期間について、無削孔の供試体と削孔した供試体の復圧曲線および透気係数を比較し、孔の存在による復圧量の増大の有無を把握した。復圧量の増大が確認できる場合には、前述したように測定深さの範囲を 15mm 以上 30mm 未満あるいは 30mm 以上とし、変化が確認できない場合には、15mm 未満とした。ここで、本実験の結果全体から求めた測定深さの範囲分布と、式(2)によって求められる測定深さと透気係数の関係を図-3 に示す。その結果、W/C の増加および乾燥期間の経過による透気係数の変化に伴い、測定深さも変化することを確認した。しかし、透気係数が 0.01~0.1 ($\times 10^{-16} \text{m}^2$) の範囲では、計算値と本実験により求めた透気係数と測定深さの関係は概ね一致するが、透気係数の増加に伴い、計算により求められる測定深さよりも、本実験で求めた測定深さの方が小さくなる傾向を示した。したがって、透気試験について現状で認識されている測定深さは、実際の測定深さとはやや乖離している可能性がある。

本方法により、実際の透気係数と測定深さの関係を大まかに把握したが、空隙構造や粗骨材の配置状況の変動が透気試験の結果に及ぼす影響に対して、孔部による影響は非常に小さいと考えられる。したがって、測定深さをより正確に把握する方法について、今後検討する必要があると考えられる。

2.2 W/C の違いが水分の逸散と表層透気性に及ぼす影響

空隙構造の緻密さ等に代表される品質の違いは、水分の逸散速度に影響を及ぼすと考えられる。したがって、品質の異なる各供試体が、飽水状態から逸散する水分量を定量的に捉え、それらが透気係数の増加割合に及ぼす影響に関して検討した。なお、作製した供試体ならびに実験方法は 2.1 と同様で、結果は全て無削孔供試体での測定結果を示している。

図-4 に、透気係数と乾燥期間の関係を示す。飽水状

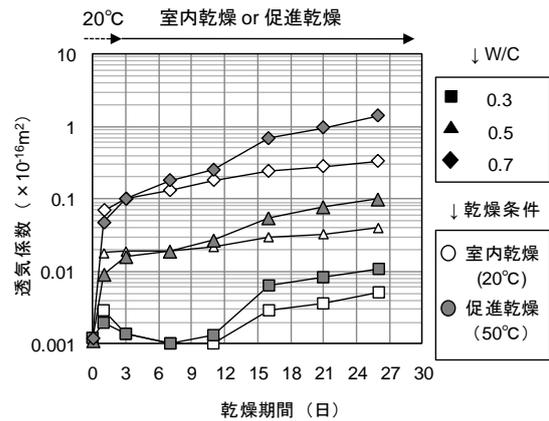


図-4 透気係数と乾燥期間の関係

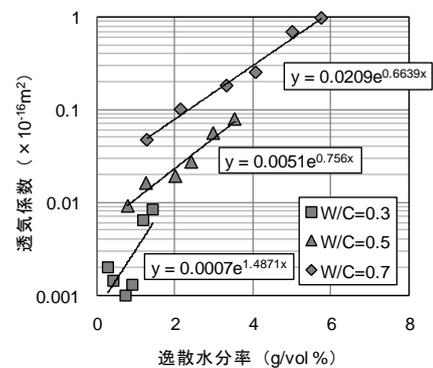


図-5 透気係数と逸散水分率の関係（促進乾燥）

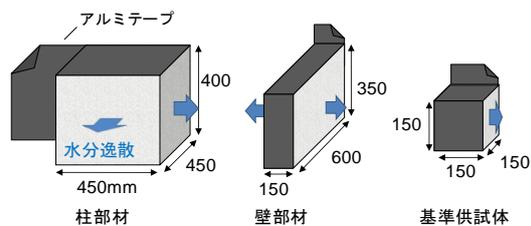


図-6 供試体諸元

態での透気係数は、測定における最低限度である 0.001 ($\times 10^{-16} \text{m}^2$) 程度であり、ほとんど透気性を示さないが、乾燥 1 日後には高 W/C ほど大きく増加する傾向を示し、おおよそ 1 オーダーずつ異なる。3 日目以降、乾燥条件が室内乾燥 (20°C) と促進乾燥とに分類されるが、いずれの条件下でも、W/C 毎に 1 オーダー程度の差を保ちながら増加する傾向を示した。

ここで、乾燥期間が 1 日目以降の透気係数と逸散水分率の関係を図-5 に示す。W/C=0.5、0.7 の場合には、W/C ごとに高い相関性が確認でき、逸散水分率の増加に対する透気係数の増加割合は、W/C によらず概ね一定となる傾向を示した。W/C=0.3 の場合には、透気係数が 0.001

表-3 示方配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					スランプ (cm)	空気量 (%)
		W	C	S	G	AE 減		
52.7	45.8	175	333	806	974	3.33	13.5	6.0

表-4 実験概要

項目	概要
供試体種類	基準供試体,部材模擬供試体 (柱,壁)
養生	封緘5日間 (屋内外雰囲気環境下)
環境条件	恒温湿室 (20°C, 60% R.H.) 屋内外雰囲気 (気温+湿度のみ変動) 屋外曝露
試験方法	・表層透気試験 (TORRENT 法) ・高周波容量, 比抵抗式による含水率測定 質量測定 (基準供試体のみ) ・材齢 91 日経過後, コア採取 →中性化促進試験 (20°C60%R.H. CO ₂ 5%, 28 日間)
測定時期	7, 28, 56, 91 日目 (屋外曝露した供試体のみ, 140 日後から約 1 ヶ月間 継続的に表層透気試験および含水率測定を実施)

~0.01 (×10⁻¹⁶m²) 程度の非常に緻密な空隙構造が形成されていることが推察でき, 他の条件とは異なる傾向を示すことがわかった。

3. 寸法および環境条件が表層透気性に及ぼす影響

3.1 実験概要

表-3 に配合, 図-6 に供試体諸元を示す。表-4 に実験方法を示す。実構造物の厚さを模擬するために, 柱および壁部材を模擬した供試体および基準供試体を作製した。部材模擬供試体は標準的な実際の施工を想定し, コンクリートを 1 層で打込み, 内部振動機を用いた締固めを行った。養生後, 測定対象面以外の面はアルミテープでシールし, 所定の環境条件下に静置した。試験は表層透気試験, 静電容量式および比抵抗式的水分計を用いた含水率測定を各材齢時に実施した。なお, 屋外曝露した供試体に限り, 実環境が各測定結果に及ぼす影響を把握する目的で, 1 ヶ月間程度継続的に試験を実施した。

3.2 実験結果および考察

(1) 材齢および部材寸法の影響

図-7 に, 恒温湿室内に静置した供試体の透気係数および基準供試体の結果に対する比で表した透気係数比と材齢の関係を示す。全体的な傾向として, 材齢の経過に伴い透気係数が増加することを確認した。これは, 材齢の経過に伴う水分逸散の進行によるものと考えられ, 既往文献の指摘⁵⁾と一致する。また, 柱部材の結果についてのみ, 上層ほど透気係数が大きくなることを確認した。この要因としては, コンクリートの打設に伴い, コンクリート表面と型枠の間には摩擦力が発生するが, これはコンクリートの自重に対して逆方向に作用する傾向が示されている。すなわち, 断面積の大きい柱部材においては, 高さ毎の摩擦力の違いが顕著であるのに対し

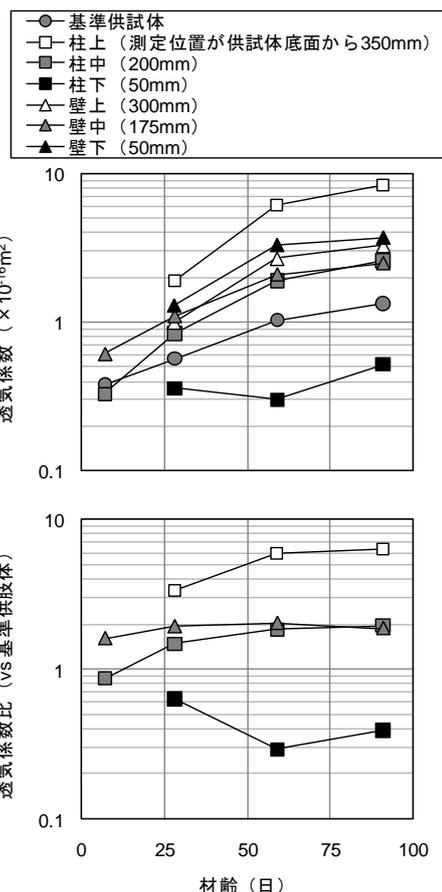


図-7 透気係数 (上段) および透気係数比 (下段) と材齢の関係 (恒温湿室)

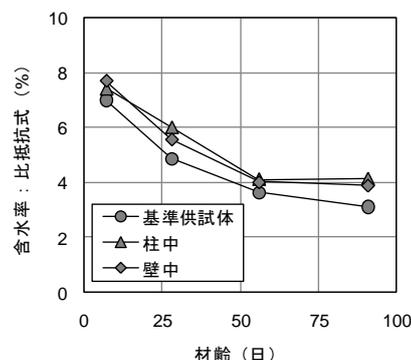


図-8 含水率と材齢の関係 (表層から深さ 30mm までの平均値)

て, 壁部材は高さ方向での変化は小さいと推察される。次に透気係数比の変化に着目すると, 材齢 56 日目までは, 供試体種類ないし測定位置によって, 透気係数比の変化の傾向は異なるが, それ以降は概ね一定であった。

比抵抗式 (KETT 社製 HI-520) による含水率測定結果と, 材齢の関係を図-8 に示す。比抵抗式の測定方法とは, 2 点間距離が 30mm となるようドリル削孔し, 2 ヶ所の削孔穴にセンサを差し込み, 先端部のセンサ間を流

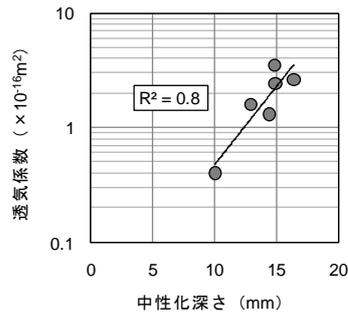


図-9 透気係数と中性化深さの関係（恒温湿室）

れる電気抵抗値より、深さ方向の含水率を測定する手法で、表層から10mm毎に計測を行った。図は、深さ30mmまでの平均値を示している。いずれの供試体も、材齢56日目以降は、含水率の減少は比較的小さくなることがわかった。

図-9に、恒温湿室内の供試体の表層透気試験の測定位置と同じ高さから採取したコアの中性化促進試験結果と、材齢91日目の透気係数の関係を示す。結果より、決定係数0.8と高い相関性を有していることから、透気係数が中性化をパラメータとしたときの耐久性を概ね反映していることを確認した。

(2) 環境条件の影響

屋外曝露した供試体の透気係数と材齢の関係を図-10に示す。前述のように、降雨による影響が無い場合には、材齢の経過に伴い透気係数は単調に増加する傾向を示すが、材齢91日目の測定結果のように、降雨の影響は透気係数を大幅に低下させ、品質の違いが表層透気性に反映されなくなる傾向を示す。したがって、測定前後の環境条件が表層透気性に及ぼす影響を把握する必要がある。

図-11に曝露期間中の気象条件を示す。日合計降雨量が約10mm程度の降雨が数度観測され、その都度、やや透気係数が低下した後に、再び増加する傾向を確認した。特に28.5mmの降雨量を観測した材齢152日目には、最大で1オーダー以上の低下が認められた。ただし、その2日後の測定時には元のオーダーまで回復することを確認した。

次に、高周波容量式水分計による含水率測定結果を図-12に示す。透気係数とは相反する傾向を示しており、供試体に及ぼす降雨とその後の乾燥の影響を、おおまかには反映していると考えられる。

(3) 含水状態を考慮した表層透気性評価手法

竣工検査で表層透気試験による耐久性評価を行うことを想定した場合、(2)の結果で示したように、基準供試体を実構造物と同じ養生、環境条件下に置くことによって、室内実験環境下において材齢56日目以降であれば、

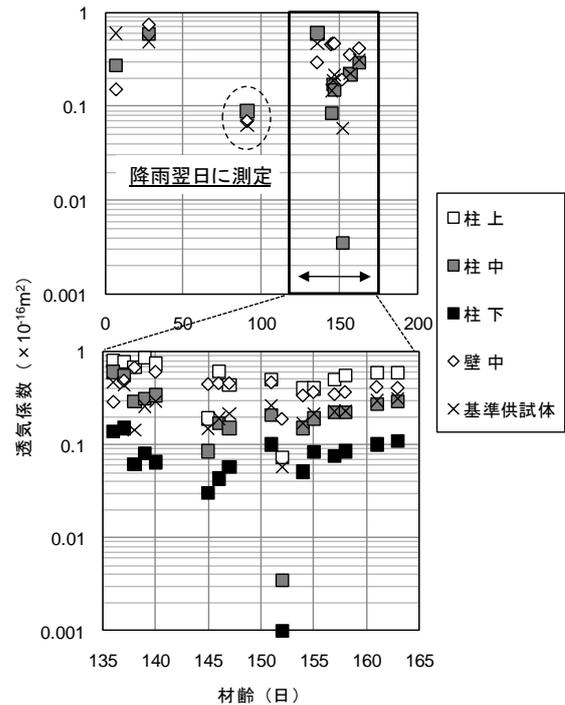


図-10 透気係数と材齢の関係（屋外曝露）

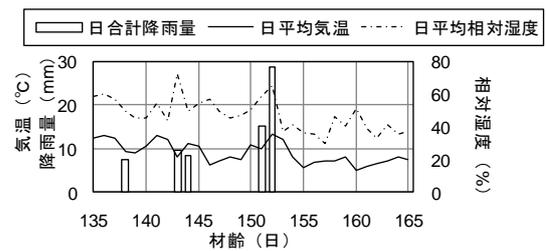


図-11 気象条件

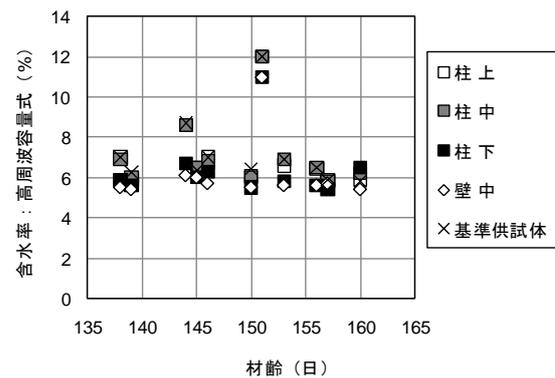


図-12 含水率と材齢の関係（屋外曝露）

透気係数の増加割合は寸法条件によらず概ね一定となることを確認した。すなわち、基準供試体の作製によって、実構造物の含水状態をある程度模擬できると考えられる。

また2.1の結果より、W/Cの異なる飽水状態のコンクリートにおいて、乾燥1日目以降は、同程度のW/Cであ

れば、概ね同じ割合で透気係数が増加する傾向を確認した。本知見と(2)の結果を参考にすると、降雨後、概ね2日程度の乾燥期間を設ければ、その後の透気係数の増加割合は、高さ方向や施工の影響による空隙構造の緻密さの違いによらず、概ね一定であると推察される。

以上により、実構造物の耐久性を、基準供試体の透気係数と比較した相対評価によって表すことが出来る可能性を示唆した。

4. まとめ

本研究から得られた成果を以下にまとめる。

- (1) 表層透気試験 (TORRENT 法) において計算される測定深さは、実験的に検討した測定深さと比較すると、透気係数の増加に伴い実験により求められる測定深さの方が深くなる傾向を示した。
- (2) 20°C60%R.H.環境下において、材齢の増加に伴う透気係数の増加量は、材齢 28 日から 91 日の範囲においていずれの条件下でも 1 オーダー以内であった。また、屋外曝露環境下においては、表層透気性の測定に及ぼす環境条件の影響は、主として降雨によるものである。
- (3) 20°C60%R.H.環境下において、寸法条件が材齢の経過に伴う透気係数の増加割合に及ぼす影響は、材齢 56 日目以降は収束する傾向を示す。
- (4) 透気係数の変化は W/C 毎の逸散水分量と相関関係を示す。また、逸散水分量は低 W/C ほど小さい傾向を示すが、ごく早期を除く透気係数の増加割合は W/C の違いによらず概ね一定である。

以上の知見より、竣工検査に表層透気試験を用いることを想定した場合、基準供試体を用いて比較することによって、品質の違いを相対的に評価できる可能性がある。

参考文献

- 1) (社) 土木学会：構造物表面のコンクリート品質と耐久性能検証研究小委員会 (335 委員会) 成果報告書およびシンポジウム講演概要集, pp.330-331, 2008.4
- 2) Torrent, R. : A two-chamber vacuum cell for measuring the coefficient of permeability to air the concrete cover on site, *Materials and Structures*, vol.25, pp.358-365.1992
- 3) 今本啓一, 山崎順二, 下澤和幸, 永山勝, 二村誠二 : 構造体コンクリートの表層透気性評価におけるシングルチャンバー法の適用性検討, 日本建築学会構造系論文集, 第 607 号, pp.31-48, 2006.9
- 4) F. Jacobs : RILEM Report 40 Non-Destructive Evaluation of the Penetrability and Thickness of the Concrete Cover, State of the Art Report of RILEM Technical Committee TC 189-NEC: 'Non-destructive Evaluation of the Concrete Cover', pp.113-131, 2007
- 5) 蔵重勲, 廣永道彦 : 脱枠材齢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, Vo1.32, No.1, 2010
- 6) 吉田彌七 : 新しいコンクリートの沈下に関する数理論的考察, 土木学会論文集第 14 号, pp.6-1,1952.9