表面透気試験を用いた中性化に伴う鋼材腐食の 耐久性設計と検査の係に関する一考察

加藤 佳孝¹・早川 健司²

¹正会員 東京理科大学准教授 理工学部土木工学科 (〒278-8510 千葉県野田市山崎2641)

E-mail: katoyosh@rs.tus.ac.jp

²正会員 東急建設(株) 土木技術部 (252-0244 神奈川県相模原市中央区田名3062-1)

E-mail: hayakawa.kenji@tokyu-cnst.co.jp

本研究では、中性化に伴う鋼材腐食において、設計－施工－検査－維持管理の有機的な係をめざし、コンクリートの中性化速度係数と非破壊試験である表面透気試験の測定結果との係を整理した。さらに、試験室の検討ではあるが、普通コンクリートの表層透気係数は、水セメント比、ブリーディング量および1層の打込み高さの関数として表現可能であることを示した。提案手法を用いて、配合選定(水セメント比とブリーディング量の選定)、検査の方法、および構造物の初期性能に関して考察した。

Key Words : *surface air-permeability, bleeding, durability design, carbonation, inspection*

1. はじめに

2007年制定コンクリート標準示方書(以下、示方書)〔設計編：本編〕¹⁾では、中性化に伴う鋼材腐食に対する照査(以下、中性化の照査)として、中性化深さの設計値と鋼材腐食発生限界深さに対する比に構造物係数を乗じた値が、1.0以下であることを確かめることにより行つてよいとされている。照査で用いる中性化速度係数は、実験や既存のデータに基づいて定めることが原則とされているが、解説に参考として、有効水結合材比の一次関数が掲載されている。確かに、有効水結合材比は、中性化速度係数に最も影響を及ぼす因子であると考えられるが、同一有効水結合材比であっても、コンクリートの構成材料割合が異なれば、中性化速度係数が変化することも予想される。既往の研究²⁾では、同一水セメント比で単位水量を変化させた場合、単位水量の増加に伴い表層コンクリートの透気性が増大し、その透気性はブリーディングと密接な係があることが指摘されている。また、著者らの検討結果³⁾でも、水セメント比が一定の条件下では、ブリーディング量とコンクリートの表層透気係数の相関が確認されており、ブリーディング量が表層コンクリートの透気性や中性化速度係数に及ぼす影響を定量的に評価する必要があると考えられる。

ここで、検査に関する示方書の記述に着目すると、示方書〔施工編：本編〕5章の解説⁴⁾には、「検査は、竣工

したコンクリート構造物の性能を直接的に検査することが理想である。」とあり、直接的に性能を検査することの重要性が指摘されている。さらに、示方書改訂小委員会報告書⁵⁾にも、「コンクリート構造物の耐久性能に関して、設計－施工－検査－維持管理の一連の有機的な係を整理すれば、コンクリートの特性値に基づいた耐久設計を行い、コンクリートの特性値の要求を満足させることができるように適切な配合設計と入念な施工を行い、耐久設計において定めたコンクリートの特性値とかぶりの実現状況を検査し、完成した構造物の初期品質・初期性能を踏まえた維持管理計画の確認・見直しを適切に行うことが理想形ではなかろうか。」との記述があり、既報⁶⁾でも同様にその重要性が指摘されている。これらの記述から、現状では、中性化速度係数などのコンクリートの特性値に基づいた、設計－施工－検査－維持管理の係が必ずしも十分ではないことがわかる。

本研究では、中性化に伴う鋼材腐食において、設計－施工－検査－維持管理の有機的な係をめざし、表面透気試験を用いた設計と検査の係について考察する。さらに、ブリーディングが表層コンクリートの透気性に及ぼす影響を実験的に把握し、ブリーディングの影響を考慮した設計の考え方も整理する。本研究では、既往の研究および著者らがこれまで実施し公表してきた実験結果を用いて、設計と検査の係について考察することを主眼とするため、詳細な実験条件および結果は、各々の参

考文献を参照されたい。

2. 検討内容の整理

(1) 実構造物の中性化速度係数の計測の代替手法

設計－施工－検査－維持管理の連係を達成するためには、コンクリートの中性化速度係数と実構造物で計測可能な手法の計測値との関連付けが必要不可欠となる。検査の段階で実構造物の中性化速度係数を直接計測できる手法が望ましいが、現状では存在せず、透気性試験との関連付けが現実的な方法と思われる。実構造物におけるコンクリートの透気性の計測に関する研究は、比較的古くから実施されており、氏家⁷⁾や今本⁸⁾などによって紹介されている。本研究では透気性試験として、非破壊であり、これまでいくつかの研究機関で検討され、比較的信頼性が高いと言われているダブルチャンバー方式のTorrent法⁹⁾による表面透気試験の結果を用いて、中性化速度係数との関係を整理する。本試験は、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、表層透気係数を式(1)により求める方法である。チャンバー全体の直径は100mmで、計測対象となる内部チャンバーの直径は50mmである。なお、対象となるコンクリートの空隙率を、測定時に正確に知るとは難しいため、通常、 $0.15\text{m}^3/\text{m}^3$ が想定値として用いられている。

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

ここに、 kT : 表層透気係数 (m^2)、 V_c : 内部チャンバーの容積 (m^3) (= 0.000165)、 A : 内部チャンバーの面積 (m^2) (= 0.001963)、 μ : 空気の粘性係数 ($\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$) (20°C で 2.0×10^{-5})、 ε : コンクリートの空隙率の想定値 (m^3/m^3)、 P_a : 大気圧 (N/m^2) (= 1)、 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 (s) (= 60)

(2) 施工がかぶりコンクリートの品質に及ぼす影響

かぶりコンクリートの品質変動に及ぼす施工上の要因としては、打込み、締固め等の段階で発生する材料分離、すなわちコンクリートの構成材料割合の変化、および水和程度を支配する養生に大別できる。またこれらの影響は、打込み時点、すなわち運搬やポンプ圧送を経たコンクリートの品質によって異なる。

示方書[施工編: 施工標準]⁴⁾には、できる限り材料

分離を小さくし均質な構造体コンクリートを達成するための施工上の留意点が示されている。例えば、打込み時に適切なワーカビリティを有したコンクリートを使用するために、部材の種類、鉄筋量や鉄筋間隔、運搬や圧送によるスランプロスなどを考慮した練上がり目標スランプの設定方法が示されている。また、施工性能にもとづくコンクリートの配合設計・施工指針(案)¹⁰⁾では、適切な材料分離抵抗性および振動締固め性を得るために必要なスランプと単位セメント量の組み合わせについて、構造諸元等も考慮して提示されている。このような方法に従って施工されれば、締固め間隔や締固め時間などの施工要因が品質に大きな影響を及ぼさないことを、著者ら¹¹⁾も実験的に確認している。ただし、従来から指摘されているように、締固め完了後のブリーディングの影響によって高さ方向に品質変動が生じる場合があり、このような変動をコンクリートの材料係数(γ)などとして、適切に考慮する必要がある。以上より、本研究では、ブリーディングが表層透気係数に及ぼす影響を検討対象とする。

本研究では、中性化速度係数と表層透気係数との関係を定式化し、ブリーディングが表層透気係数に及ぼす影響を考慮することで、間接的にブリーディングが中性化速度係数に及ぼす影響を定式化しており、この影響に関しては、3.(1)にて詳述する。

3. 表層透気係数と種々の要因の整理

(1) 中性化速度係数と表層透気係数の関係

図-1は、既往の研究結果^{12), 13), 14), 15), 16)}を用いて、中性化速度係数と表層透気係数の関係を示したものであり、普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートを対象として抽出した。表-1は、各文献における供試体の養生条件、表層透気係数の測定時期および中性化試験の方法および実施時期を整理したものである。中性化環境は屋内、自然および促進があるため、炭酸ガス濃度の換算が可能な魚本・高田式¹⁷⁾を用いて、自然環境の炭酸ガス濃度0.035%に変換した後、ルート則に基づき中性化速度係数を求めた。屋内の炭酸ガス濃度は文献No.IIには示されていないため、ここでは、既往の研究¹⁷⁾で実測されている0.07%とした。なお、参考文献¹⁸⁾では居室で計測した結果が0.04~0.12%と報告されており、実験室内の実測結果である0.07%と概ね整合していると思われる。また、文献No.IVの場合、中性化深さの計測が複数あるため、全てのデータを用いてルート則に基づき中性化速度係数を求めた。ここで、文献No.I, II, IIIは主に水セメント比の違いを、文献No.IVは主に養生方法の違いを、文献No.Vは測定位置と表層透気係数の測定材齢の違いを検討したものである。

図-1 中性化速度係数と表層透気係数の関係

表-1 参考文献と条件の整理

No.	出典	養生条件	試験材齢	中性化試験条件
I	RILEM TC189 2007 ¹²⁾	7日間 20℃, 95%RH.⇒ 20℃, 50%RH.	28日	Dry room (20℃, 50%RH.) 500日
II	小野・上東 2005 ¹³⁾	2日間湿潤⇒ 約1年まで 20℃60%RH.	約1年	約1年から自然環境約3年
III	今本ら 2009 ¹⁴⁾	1ヶ月間 20℃水中⇒1ヶ月間 20℃, 60%RH.	2ヶ月 (RILEM法の透気係数とkTの関係から推定)	雨掛かりのない自然環境 約4年
IV	白根ら 2010 ¹⁵⁾	28日間の養生条件変化⇒60%RH.	56日	20℃, 60%RH. CO ₂ 5%, 56日で開始し促進 1, 4, 8週
V	水上ら 2011 ¹⁶⁾	5日間封緘⇒ 20℃, 60%RH.	28, 56, 91日	20℃, 60%RH. CO ₂ 5%, 91日で開始し促進 4週

図より、全体的な傾向としては、表層透気係数の増加に伴い、中性化速度係数が大きくなっているが、異なる実験条件で行われた両者の関係は、全体として同一の関係にはない。これは、表層透気係数の測定時期や、中性化進行における環境条件の違いが影響していると推察される。表層透気係数は、コンクリートの空隙組織の緻密さと含水状態の影響を受ける。そのため、同一の材料・配合で製造され、同一の施工を施されたコンクリートであっても、施工後の環境条件や材齢が異なれば、コンクリートの表層透気係数は経時的に変化する。図-1中の文献No.Vは、測定材齢の異なる表層透気係数の結果と、材齢91日から促進中性化した結果を示しているが、同一の中性化速度係数に対して、表層透気係数が変化してい

図-2 測定材齢毎のkTと中性化速度係数の関係

ることがわかる。また、中性化の進行には環境作用、特に水分の影響が大きく^{例えば19)}、同一品質のコンクリートであっても、水分供給の有無によってコンクリートの中性化進行は異なる。図-1は、表層透気係数の測定材齢が異なるため単純な比較はできないが、水分供給を受ける環境にある文献No.IIの中性化速度係数が小さいことから、このような影響があることがわかる。

本研究は、施工後に達成されたコンクリートの品質を表面透気試験で確認し、その結果をコンクリートの中性化速度係数の特性値と関連づけることで、設計-施工-検査-維持管理の連係を試みるものである。そのため、表層透気係数と関連づける中性化速度係数は、ある定められた環境下で得られる結果とする必要があり、実際の中性化進行の予測においては環境の影響を別途考慮することとなる。

そこで、水分供給の影響のある文献No.IIと、換算によって表層透気係数を求めてるNo.IIIを除き、測定材齢28日 (kT_{28}) (文献No.I, No.V) および56日 (kT_{56}) (文献No.IV, No.V) の結果と中性化速度係数の関係を図-2に示す。なお、文献No.IIは50%RH.であるが、ルート

図-3 同一供試体における $kT28$ と中性化速度係数の関係

t則を適用した中性化深さの予測で湿度の影響を考慮した既往の研究²⁰⁾に基づき、60%R.H.における中性化深さに換算している。具体的には、50%R.H.における中性化深さの進行は、60%R.H.に対して1.17倍であることを考慮して換算している。図より、測定材齢毎に整理した表層透気係数の常用対数と中性化速度係数 (α mm/ $\sqrt{\text{year}}$) は概ね線形関係があり、式(2)のように定式化できる。

$$\alpha = a_i \log(kTi) + b_i \quad (2)$$

ここに、 i : 表層透気係数の測定材齢、 a_i , b_i : 実験定数 ($a_{28}=2.81, b_{28}=51.9, a_{56}=4.72, b_{56}=83.2$)

なお、これらの近似直線は実測値の平均的な関係を示している。図中には、式(2)の結果 (図中黒色実線)、予測結果を1.2倍 (図中点線) および1.3倍 (図中灰色実線) した結果も合わせて記載している。

測定材齢28日のデータが多く収集できたため、本研究では、この結果に基づいて得られた関係を4.で用いることとする。なお、本研究では測定材齢28日を用いているが、以降で求める種々の関係について、28日以外の材齢で定式化されれば、その材齢の結果を用いることも可能であると考えられる。

本研究では、ある定められた環境下における表層透気係数と中性化速度係数の関係を定式化し (式(2))、ブリーディングが表層透気係数に及ぼす影響を考慮することで (3.(2), 3.(3))、間接的にブリーディングが中性化速度係数に及ぼす影響を定式化する。これは、ブリーディングが表層透気係数に及ぼす影響と、ブリーディングが中性化速度係数に及ぼす影響が同様であることを前提としていることとなる。表層透気係数は気体の移動のし易さを示す指標であるのに対して、中性化速度係数は炭酸ガスの移動と水和生成物との反応によって定まる特性値である。そのため中性化における反応の影響によっては、ブリーディングが表層透気係数に及ぼす影響と、ブリーディングが中性化速度係数に及ぼす影響が異なる可

図-4 水セメント比と表層透気係数の関係

図-5 ブリーディング量と表層透気係数の関係

能性がある。ここで、ブリーディングの影響を確認するためには、同一供試体内の異なる高さにおける表層透気係数と中性化速度係数の関係を検討する必要がある、文献No.Vで該当する結果のみを取り出し図-3に示す。図より表層透気係数と中性化速度係数の関係は概ね式(2)で示される関係にあり、ブリーディングが表層透気係数あるいは中性化速度係数に及ぼす影響が同様であると考えられる。ただし、検討は1ケースのみであるため、今後も継続的に検討する必要があるが、本研究では、ブリーディングが表層透気係数に及ぼす影響と、ブリーディングが中性化速度係数に及ぼす影響が同様であるとする。

(2) 表層透気係数の予測

図-4は、3種類の水セメント比 (0.45, 0.55, 0.65) について粗骨材量を変化させた場合、および水セメント比を0.55一定として、単位水量あるいは細骨材種類を変化させた場合や増粘剤を混入した場合の、水セメント比と表層透気係数の関係である³⁾。材齢5日まで封緘養生し、その後、室内に静置している。図より、同一水セメント比でも表層透気係数が異なっていることがわかる。

図-5は、図-4に示した水セメント比0.55のときの、ブリーディング量と表層透気係数の関係であり、一定の相関が認められる。図中の実線は直線回帰の結果である。なお、既往の研究においても、単位水量の大小によるブリーディングの発生のし易さが、表層透気係数に影響を

図-6 実測値 $kT28$ と予測値 $kT28$ の関係

及ぼすことが指摘されている²¹⁾。コンクリート上面に到達するブリーディング水は、型枠面との境界を上昇する水と、コンクリート内部から上昇する水の総和であると考えられ²²⁾、水の上昇に伴って水みちが形成される。また、コンクリート上面に達することなくコンクリート内部に留まる水は²²⁾、硬化コンクリート中の空隙になる可能性がある。ブリーディングによって生じた水みちや空隙が、コンクリートの物質透過性に及ぼす影響は必ずしも定量的に明らかとされていないが、水みちや空隙の増加に伴いコンクリートの物質透過性も増加する傾向を示すと考えられる。このように、ブリーディングの影響により、同一水セメント比のコンクリートにおいても表層透気性は異なる可能性があり、本研究では、表層透気係数を水セメント比 (W/C) およびブリーディング量 ($Bl\text{ cm}^3/\text{cm}^2$) の関数として表現する。

式(3)は、著者らの実験結果³⁾を用いて重回帰分析を行った結果である。決定係数は0.66であり、式(3)を用いて計算した結果(図-6参照)は、実測値の70%を概ね上回る(図-6中の点線)。そのため、水セメント比とブリーディング量から式(3)を用いて予測した結果を1.43 ($=1/0.7$) 倍することで、概ね安全側の評価が可能であると考えられる。

$$\log(kT28) = A \times \frac{W}{C} + B \times Bl + C \quad (3)$$

ここに、 A , B , C : 実験定数 ($A = 1.88$, $B = 1.71$, $C = -17.5$)

(3) 材料分離が表層透気係数に及ぼす影響

ここでは、同一構造物内の高さ方向の表層透気係数の変動に関して検討するが、示方書[施工編: 施工標準]には、コンクリート打込みの1層の高さは、使用する内部振動機の性能などを考慮して40~50cm以下を標準としている。そのため、これ以上の高さの構造物を建造する場合には打重ねる必要があり、高さ方向の表層透気係

図-7 表層透気係数の高さ方向の変化

数の変動の検討においても、打重ねの影響を考慮する必要がある。

図-7は、高さ350mm、鉄筋のあきが35mmの供試体の表層透気係数の計測結果であり、水セメント比0.55、単位水量155, 170, 185 kg/m^3 と単位水量170 kg/m^3 の配合に増粘剤を混入しブリーディングの発生を抑制した場合の合計4種類の結果である^{11), 23)}。材齢5日まで20℃封緘養生し、その後20℃、60%R.H.の室内に置き、材齢20日および91日の測定結果である。各測定点の縦軸の値は、底面からチャンバーの中心までの高さ(以下、測定中心高さ)

(70mm, 170mm, 270mm)を用いた。 $kT20$ 比および $kT91$ 比は、各高さの測定結果を基準供試体(1辺150mmの立方体)の同一測定材齢における表層透気係数で除した値である(以下、表層透気係数比)。なお、基準供試体の測定材齢28日の結果は式(3)の導出に用いている。何れの測定材齢も、単位水量185 kg/m^3 をのぞき、中・下層のコンクリートの表層透気係数は、基準供試体と同等以下であることがわかる。上層のコンクリートでは、何れの場合も基準供試体の表層透気係数を大きく上回っており、材料分離に伴うブリーディング水の影響によるものと考えられる。ここで、測定材齢の影響を検討するため、図-8に測定材齢20日と91日の表層透気係数比の関係を示す。図より、測定材齢によって表層透気係数比が多少異なるものの、基準供試体に対する高さ方向の表層透気係数の変動は、測定材齢に依らず概ね一定の関係を示している。

図-9は、水セメント比0.55、単位水量170 kg/m^3 、断面

図-8 $kT20$ 比と $kT91$ 比の関係

図-9 表層透気係数比の高さ方向の変化

500×500mm, 高さ800mm, 1層約270mmの3層で作製した供試体の表層透気係数の結果である²³⁾。打設面をシートで覆い材齢5日まで20℃の室内で養生し, 脱型後は温度制御されていない室内で保管している。なお, 各測定点の縦軸の値は図-7と同様に測定中心高さ(60mm, 170mm, 290mm, 400mm, 510mm, 630mm, 750mm)を, 横軸は測定材齢28日の表層透気係数比を示している。凡例は鉛直方向の鉄筋のあきと水平方向の鉄筋のあきを意味しており, 図中の点線は打重ね位置を示している。底面から1層目および2層目の表層透気係数は, そのほとんどが基準供試体よりも小さい値を示している。これは, 上層コンクリートの圧密の影響によるものと考えられ, 底面に近いほど, より小さな数値を示す傾向にある。図-9に示した結果では, 基準供試体に対して1層目が平均で0.5程度, 2層目が平均で0.8程度となった。1層打ちの結果(図-7)では, 底面から測定中心までの高さが270mmにおける表層透気係数が非常に大きくなったのに対し, 打重ねた場合の最上層以外のコンクリートには, このような現象は確認できず, 圧密の影響の無い最上層のコンクリートのみ, 1層打ちとほぼ同様な傾向を示している。また, 今回の範囲内では, 鉛直および水平方向の鉄筋のあきは, 表層透気係数の高さ方向の変動には,それほど大きな影響を及ぼさない結果となっている。

高さ方向の表層透気係数の変動は, コンクリート自体

図-10 ブリーディング指標と表層透気係数比の関係

のブリーディング性状と, 締固め後のブリーディングの駆動力, すなわち打込み高さによって異なる自重の大きさに支配されると考えられる。そこで, コンクリートのブリーディング試験結果に表面透気試験における底面から測定中心までの高さを乗じたもの(以下, ブリーディング指標: Blh)を指標として, 表層透気係数比との関係を整理した結果を図-10に示す。なお, 打重ねの場合は, 底面からの高さではなく最上層のみの高さとして考慮し, 1層および2層は圧密の影響で基準供試体よりも小さな数値を示しているため除外した。打重ねの場合の表層透気係数の測定材齢は28日, 凡例の1層は図-7の結果であり, 測定材齢20日と91日である。図より, ブリーディング指標が2付近までは, 基準供試体とほぼ等しい表層透気係数を示すが, その後, 直線的に増加している。この関係を定式化すると, 式(4)のようになる。なお, 本研究の範囲では検討数が少ないため今後も継続した検討が必要であるが, 本研究では, 表層透気係数比の高さ方向の変動は, 表層透気係数の測定材齢91日までは測定材齢に依らず式(4)により求まることとする。

$$\frac{kTi}{kTi_s} = 1.0 (Blh \leq I) \quad (4)$$

$$\frac{kTi}{kTi_s} = II \times Blh + III \quad (I < Blh)$$

ここに, kTi_s : 基準供試体の測定材齢 i における表層透気係数(m^2), Blh : ブリーディング指標(cm^3/cm) (ブリーディング量 $0.2cm^3/cm^2$ 程度, 高さ35cmまで検討), I, II, III : 実験定数 ($I=2.09, II=1.80, III=-2.76$)

図中の点線は, 式(4)で得られる透気係数比を1.1倍したものであるが, 高さ方向の変動に関しては, ブリーディング量と高さから式(4)を用いて予測した結果を1.1倍することで, 概ね安全側の評価が可能である。

ここで, 1層の打込み高さが35cm(底面から測定中心までの高さを27cmとする), 水セメント比0.50, ブリーディング量 $0.10cm^3/cm^2$ を例に試算してみる。測定中心高

さとブリーディング量からブリーディング指標を求め、これを式(4)に代入することで、測定中心高さにおける表層透気係数は基準供試体の2.1倍(安全側:2.3倍)と求まる。水セメント比とブリーディング量を式(3)に代入し、高さ方向の変動が無い、すなわち基準供試体の測定材齢28日の表層透気係数($0.41 \times 10^{-16} \text{m}^2$)を得る。求めた値を2.1倍することで、測定中心高さにおける測定材齢28日の表層透気係数 $0.86 \times 10^{-16} \text{m}^2$ (安全側の評価であれば2.3倍することで $0.94 \times 10^{-16} \text{m}^2$)が求まる。求めた表層透気係数を式(2)に代入することで中性化速度係数が得られる。この場合、測定中心高さ27cmにおける中性化速度係数は、高さ方向の変動がない基準供試体の中性化速度係数に対して1.15倍(安全側:1.17倍)となる。

(4) 本研究で考慮していない要因の整理

式(2)、式(3)、式(4)で用いた著者らの既往の成果は、普通コンクリートを、1層の打込み高さが35cm以内で内部振動機を用いて締固め、封緘養生した、品質管理が容易な試験室で実施した結果が基本となっている。そのため、使用材料、配合、運搬、締固め方法、打重ね、養生などの影響や、供試体と実構造物の差異などの影響を今後も検討する必要がある。例えば、昨今、養生の重要性が再認識され、多くの検討が実施されている^(例えば24), 25)。本研究で対象とした主な養生条件は封緘養生であり、水中養生に近い養生や透水性型枠などを用いた養生の場合では、同配合の同材齢におけるコンクリートの表層透気係数は、本研究で対象としたコンクリートよりも小さな値を示すと考えられる。式(2)の定式化に用いた文献No.Iの養生条件も封緘養生とは異なるため、今後、式(2)～式(4)の定式化において、養生の効果を説明変数として考慮していく必要がある。また、セメント種類が異なれば、式(2)や式(3)の係数に影響を及ぼすと考えられ、その影響も検討していく必要がある。

以上のように本研究の成果は限定された範囲での結果に基づいており、今後も継続した検討が必要であるが、次章では、これらの式を用いて表面透気試験を用いた設計と検査の連係の考え方を示す。なお、本研究で用いた表面透気試験では、表層透気係数が $1.0 \times 10^{-16} \text{m}^2$ 程度の場合、表面から深さ30～40mm程度のコンクリートの平均的な透気係数が測定される²³⁾。そのため、かぶりが40mmを大きく超えるような場合では、計測される表層透気係数が、かぶりの平均的な品質を表現していない可能性がある。一般的には表層部より内部のコンクリート品質が高いため、表層透気係数によってかぶりの平均的な品質を表現した場合は、安全側の評価になると考えられる。以上のことから、かぶりが大きい場合の評価方法は、今後も検討する必要があるが、本研究では、安全側の評価が可能であると考えられることから、表層透気係

数がかぶりコンクリートの平均的な品質を表現するとして検討を進める。

4. 表面透気試験を用いた設計と検査の連係の考え方について

(1) 表層透気係数を用いた設計の考え方

本研究では、材料・配合および施工要因が実構造物で達成されるコンクリートの品質(ここでは、中性化速度係数)に及ぼす影響を、表層透気係数によって評価可能であることを前提とし、表面透気試験を実構造物の検査に用いることを想定している。また、品質が同じコンクリート構造物の中性化の進行は、構造物が置かれた環境条件によって異なるが、この影響は、検査の可否判定の基準値として用いる表層透気係数には含まず、中性化深さの予測において考慮する。このような考え方にに基づき、コンクリートの中性化速度係数の設計値の設定を式(5)により行う(以下、本手法)。

$$\begin{aligned}\alpha_d &= \alpha_k \cdot \beta_e \cdot \gamma_c \\ \alpha_k &\geq \gamma_{pa} \cdot \alpha_p \\ \alpha_p &= f(kT28) \\ kT28 &= f(W/C, Bl) \cdot \beta_{cl} \cdot \gamma_{pkr} \cdot \gamma_{pbl} \cdot \gamma_{ckt} \cdot \gamma_{cc}\end{aligned}\quad (5)$$

ここに、 α_d : 中性化速度係数の設計値($\text{mm}/\sqrt{\text{year}}$)、 α_k : 中性化速度係数の特性値($\text{mm}/\sqrt{\text{year}}$)、 β_e : 環境作用の程度を表す係数、 γ_c : コンクリートの材料係数、 γ_{pa} : 式(2)の精度に関する安全係数、 α_p : 中性化速度係数の予測値($\text{mm}/\sqrt{\text{year}}$)、 β_{cl} ($= kTi / kT_s$): 高さ方向の変動を表す係数、 γ_{pkr} : 式(3)の精度に関する安全係数、 γ_{pbl} : 式(4)の精度に関する安全係数、 γ_{ckt} : 基準供試体および表面透気試験のばらつきに関する安全係数、 γ_{cc} : 供試体と実構造物の差に関する安全係数

本研究の検討範囲は限定的であるが、中性化に伴う鋼材腐食において、表面透気試験を用いた設計と検査の連係の考え方を示す上では、具体的な例を用いて現行の設計体系と比較することが有意義であると思われる。ただし、用いている具体的な数値は、あくまでも考え方を理解しやすくするための手段であり、数値そのものが信頼性の高い結果を提示しているわけではないことに注意されたい。

表-2に示方書[設計編:本編]の中性化の照査および材料の設計値(中性化速度係数)をまとめたものと、検査にて表面透気試験を用いることを前提とした本手法との対応を示す。

環境作用の程度を表す係数(β_e)は、示方書では屋外暴露の結果に基づいて有効水結合材比と中性化速度係数

表-2 示方書と提案手法の対比

項目	示方書	本手法
α_d	$\alpha_k \cdot \beta_e \cdot \gamma_c$	$\alpha_k \cdot \beta_e \cdot \gamma_c$
α_k	$\gamma_p \cdot \alpha_p$	$\gamma_{pa} \cdot \alpha_p$
α_p	$f(W/B)$	$f(kT28)$
$kT28$	-	$f(W/C, Bl) \cdot \beta_{cl} \cdot \gamma_{pkT} \cdot \gamma_{pbl} \cdot \gamma_{ckT} \cdot \gamma_{cc}$

$$R_s = H_u(100 - H_u)(140 - H_u)/192000$$

図-11 中性化深さの進行予測における湿度の影響

の関係が求められているため、乾燥しやすい環境では1.6を、乾燥しにくい環境では1.0としている。これに対し、図-2および式(2)で示したように、本研究では、既往の研究に基づき60%RHにおける中性化速度係数の結果を用いている。ここで、既往の研究²⁰⁾を参考にすると(図-11参照)、中性化の進行に及ぼす相対湿度の影響は、60%および20%で1.0、40%で最大値1.25を示す関数となっており、本研究における環境作用の程度を表す係数(β_e)も、図-11中の R_s と同様の関数として与えることが可能であると考えられるが、詳細な影響については今後の課題とし、本論文での取り扱いについては、4.(3)にて説明する。

示方書のコンクリートの材料係数(γ_c)は、実構造物における材料分離の影響や標準養生供試体との品質の差を考慮した安全係数であると考えられ、その影響は中性化速度係数の設計値の設定において考慮されている。本研究では、これらの影響を高さ方向の変動を表す係数(β_{cl})、供試体と実構造物の差に関する安全係数(γ_{cc})として考慮し、表層透気係数の設定において考慮することとしている。なお、本研究の結果は試験室の結果に基づいているため、現時点では供試体と実構造物の差に関する安全係数(γ_{cc})の具体的な数値はわからないため、4.(3)では1.0とする。

示方書におけるコンクリートの材料係数が包含する影響の解釈が正しければ、本手法における中性化速度係数の設計値の設定においてコンクリートの材料係数を考慮する必要は無いと考えられ、4.(3)ではコンクリートの材料係数(γ_c)を1.0としている。

図-12 水セメント比とkT28の関係 (Bl=0.10cm³/cm²)

中性化速度係数の特性値と中性化速度係数の予測値との関係は、示方書と同様とするが、中性化速度係数の予測値の精度に関する安全係数は、式(2)の精度に関する安全係数(γ_{pa})としている。

中性化速度係数の予測値は、表層透気係数から式(2)を用いて予測する。

圧縮強度等の試験結果で見られるのと同じく、表面透気試験結果も同一バッチのコンクリートから供試体を作製しても、測定結果は等しくない。このばらつきには、コンクリート自体のばらつきと測定方法のばらつきが含まれており、式(5)および表-2では γ_{ckT} として考慮している。本研究で基準として用いた供試体の測定結果の変動係数は配合によって若干異なるが、平均的な変動係数は20%程度であった。示方書の圧縮強度と同様に正規分布を仮定して95%確率で安全係数を求めると1.45となり、1 σ 内を許容範囲とすれば安全係数は1.25となる。コンクリートの中性化速度係数のばらつきを考慮した安全係数の設定方法について、示方書には圧縮強度のような明確な記述が無いため、妥当な取扱い方法については今後も議論が必要であると思われるが、ここでは1.25を採用する。

(2) パラメトリックスタディ

本手法では、中性化速度係数と表層透気係数を、水セメント比(W/C)、ブリーディング量(Bl)、高さ(材料分離による基準供試体に対する変動 β_{cl})、ばらつきおよび精度に関する安全係数 γ_{ckT} 、 γ_{pa} 、 γ_{pkT} 、 γ_{pbl} に基づき定式化している。ここでは、これらの値の変化が表層透気係数あるいは中性化速度係数に及ぼす影響をパラメトリックスタディにより検討する。

図-12は、水セメント比と表層透気係数の関係を示したものであり、ブリーディング量を0.1cm³/cm²一定としたときの、安全係数の影響および高さの影響を算定した結果である。1層の打込み高さを35cm(測定中心高さを27cm)としている。なお、通常水セメント比が変化すれば、ブリーディング量も当然変化するが、ここでは一

図-13 水セメント比と中性化速度係数の関係
($Bl=0.10\text{cm}^3/\text{cm}^2$)

図-14 水セメント比と中性化速度係数の関係

定として算定しているため、仮想的な状況であることに注意されたい。表層透気係数の予測に係わるばらつきおよび精度に関する安全係数は、単純な積として考慮しているため、安全係数を考慮していない結果（図中○）の、1.25倍（図中△）および $1.25 \times 1.43 = 1.79$ 倍（図中□）となっている。測定中心高さ27cm（図中27cm高さ）では、安全係数1.79倍に、ブリーディング指標を式(4)に代入して得られる変動比率2.1倍と $\gamma_{pt} = 1.1$ 倍を乗じて、4.13倍（図中◇）となっている。

図-13は、安全係数の考慮の有無が、水セメント比と中性化速度係数に及ぼす影響を示しており、図-12の測定中心高さ27cm以外の算定結果を中性化速度係数に変換した場合にくわえて、式(2)の精度に関する安全係数（ γ_{pa} ）を図-2の一点破線で示した1.2とした場合（図中◇全て）の結果である。先ほどの表層透気係数の結果で、1.25倍、1.79倍であった安全係数の影響は、中性化速度係数に対しては、おおよそ1.05倍、1.12倍となっている。

図-14は、全ての安全係数を考慮した場合のブリーディング量の変化（0.00, 0.10, 0.15 cm^3/cm^2 ）が、水セメント比と中性化速度係数に及ぼす影響を示している。一般的には、低水セメント比ほどブリーディング量が少なくなるため、実際の水セメント比と中性化速度係数の関係

表-3 設計条件

中性化に対する耐用年数 year	50
かぶりの設計値 mm	70
中性化残り mm	10
中性化深さの設計値 mm	≤ 60
中性化深さの設計値のばらつきを考慮した安全係数 γ_b	1.15
中性化速度係数の設計値 $\alpha_d \text{ mm}/\sqrt{\text{year}}$	≤ 7.38
環境（東京）	平均相対湿度 % 降水日数 day
	60 133

環境条件は気象庁提供データの2001～2010年の平均値

は、低水セメント比でブリーディング量が少ない結果と高水セメント比でブリーディング量が多い結果を結んだものになると考えられる。また、図中には測定中心高さ27cmの算定結果（図中0.10-27cm, 0.15-27cm）も示しているが、ブリーディング量が0の場合は、式(4)においてブリーディング指標が0となるため高さ方向の変動は無く、27cm高さにおいても図中の $Bl = 0.00\text{cm}^3/\text{cm}^2$ の算定結果と等しくなる。

(3) 適用例

a) 本手法に基づく設計例

本研究の結果を用いた場合の、中性化の照査における設計の流れを示す。

表-3は想定した設計条件を示している。上層コンクリートの圧密の影響を受けない最上層を対象として、この設計条件を満足する水セメント比とブリーディング量を、1層の打設高さが35cm（測定中心高さ27cm）の場合について試算する。

中性化速度係数の設計値と特性値の関係には、環境の影響とコンクリートの材料係数を考慮する必要がある。

環境の影響については、図-11に基づき降水期間は中性化は進行しないと仮定すると、表-3に示した降水日数より、1年間に中性化が進行する期間は（365日－133日）／365日＝0.64となる。また、降水期間以外の相対湿度の変化が中性化の進行に影響すると考えられるが、ここでは、降水期間以外の相対湿度は、平均相対湿度（60%RH）と仮定した。厳密には、降水日数としてカウントされている日内においても降水の有る時間帯と無い時間帯があることや、平均の相対湿度は降水期間も含んだものであることから、実際の中性化の進行と本研究の仮定は異なると考えられる。前記したように、環境作用が中性化の進行に及ぼす影響については、今後の検討課題とし、本研究では簡易な仮定に基づき適用例を試算することとした。以上の仮定に基づく、式(2)を求めた実験結果の相対湿度が60%であるため、中性化が進行する期間の平方根が環境作用の程度を表す係数となり、今回の場合は $\beta_e = 0.8$ となる。

コンクリートの材料係数については、4.(1)に記したように1.0とする。

これらの条件と設定した安全係数、および設計条件を満たす表層透気係数を表-4に示す。

表-3の中性化速度係数の設計値と、環境作用の程度を示す係数およびコンクリートの材料係数から、中性化速度の特性値を求める。

続いて、表層透気係数から中性化速度係数を予測する式(2)の精度に関する安全係数を考慮して、中性化速度係数の予測値を定める。

式(2)を用いて、中性化速度係数の予測値に対応する表層透気係数を求める。この数値は、実構造物の計測結果がこの条件を満たしていれば、設計条件を満足することを示しており、この数値を検査の合否判定の基準値(以下、 $KT28_p$)と考えることもできる。

さらに、式(3)の精度に関する安全係数およびばらつきに関する安全係数を考慮して、高さ方向の変動が無い場合の表層透気係数($KT28_s$)が定まる。この条件を満足するように、ブリーディング量を考慮して水セメント比を選定するが、最上層の上部では式(4)と式(4)の精度に関する安全係数を用いて目標とする表層透気係数($KT28_p$)を求め、これを満足する水セメント比を選定することとなる。

計算結果を図-15に示す。図中には、最上層の上部(測定中心高さ27cm)の場合(図中、 $KT28_p$)と、高さ方向の変動を無視した場合(図中、 $KT28_s$)を示している。図から、ブリーディング量の増加に伴い、条件を満足する水セメント比は低下していくことがわかる。なお、今回の測定中心高さ27cmでは、ブリーディング量が $0.077 \text{ cm}^3/\text{cm}^2$ 以下であれば、式(4)より高さ方向の品質変動は無いため、 $KT28_p$ と $KT28_s$ の結果が等しくなっている。条件を満足するブリーディング量と水セメント比との組み合わせは、 $KT28_p$ の計算結果の内側となり、例えば、ブリーディング量が $0.1 \text{ cm}^3/\text{cm}^2$ であれば、水セメント比が0.52未満となる配合であればよいこととなる。

b) 本手法に基づく検査の考え方と初期性能の把握

本研究では、材料分離が構造体かぶりコンクリートに及ぼす影響を考慮すべく、ブリーディング量を指標として採用している。ブリーディング試験はJIS A 1123に基づき実施しているが、この場合、ブリーディング水の上昇がなくなるまで計測する必要があるため、少なくとも3時間程度は必要となる。そのため、本試験をコンクリートの受け入れ検査として採用することは現実的ではないが、施工記録として残しておくことは、製造プラントでの品質管理、翌日以降の配合修正や不具合発生時の原因究明などのために有意義であると考えられる。

また、構造体かぶりコンクリートの検査は材齢28日を前提として具体例を用いて説明したが、式(2)～式(4)で

表-4 安全係数等の条件と設計条件を満足する表層透気係数

環境作用の程度を表す係数 β_e	0.8
コンクリートの材料係数 γ_c	1.0
中性化速度係数の特性値 $\alpha_k = \alpha_d / (\beta_e \cdot \gamma_c) \text{ mm}/\sqrt{\text{year}}$	≤ 9.23
式(2)の精度に関する安全係数 γ_{pa}	1.2
中性化速度係数の予測値 $\alpha_p \leq \alpha_k / \gamma_{pa} \text{ mm}/\sqrt{\text{year}}$	≤ 7.69
中性化速度係数の予測値を式(2)を用いて表層透気係数に換算した数値 ($KT28_p$) $\times 10^{-16} \text{ m}^2$	≤ 0.86
式(3)の精度に関する安全係数 γ_{kt}	1.43
式(4)の精度に関する安全係数 γ_{hd}	1.1
ばらつきに関する安全係数 γ_{dr}	1.25
供試体と実構造物の差に関する安全係数 γ_c	1.0
高さ方向の変動が無い場合の表層透気係数 ($KT28_s$) $\times 10^{-16} \text{ m}^2$	≤ 0.48

図-15 条件を満たす計算結果

求めた実験定数を違う材齢で算出すれば、他の材齢での検査も可能になると思われる。何れにしても、これらの実験定数を定めた材齢で検査を実施する場合、計測日直前に雨水等によって計測面に水が供給される場合は、かぶりコンクリートの含水率が急激に変化し、結果として表層透気係数も変化すると考えられる。著者らの検討結果¹⁰⁾では、降雨後のかぶりコンクリートの含水率は急速に増加するものの、2日後には降雨前の含水状態に戻ることを確認しており、検査実施に際しては、これらの影響を考慮する必要がある。例えば、検査日の前日に降雨の可能性がある場合は、降雨前日と降雨2日後の計測結果に基づいて、当該検査日の結果を推測することなどが考えられる。測定した結果と $KT28_p$ を比較して、検査の結果を判定することとなる。

測定結果と式(2)の精度に関する安全係数 γ_{pa} を用いて実際に達成されたコンクリートの中性化速度係数の特性値(初期性能)を把握し、この結果に基づいて中性化の進行を予測し、維持管理計画に反映させることができる。

5. おわりに

本研究では、中性化に伴う鋼材腐食において、表面透気試験を用いた設計と検査の連係、および初期性能の把握とその後の維持管理への活用に関して一つの考え方を提案した。検討過程において、限られた条件ではあるが、表層透気係数は水セメント比、ブリーディング量および1層の打込み高さの関数として表現可能であることを示した。

本文中で記載したとおり、本研究で対象としていない要因が残されており、今後も継続して検討を進めていく予定である。

謝辞：本研究の一部は、科研費（23360189）の助成を受けたものである。

参考文献

- 1) 2007 年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕，土木学会，2008.
- 2) 松崎晋一郎，吉田亮，岸利治，魚本健人：単位水量を変えた角柱供試体における高さ方向の透気性変化に関する一考察，第 36 回土木学会関東支部技術発表会，V-35，2009.3.
- 3) 早川健司，加藤佳孝：材料分離がコンクリートの表層透気性に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，pp.647-652，2011.
- 4) 2007 年制定コンクリート標準示方書〔施工編〕，土木学会，2008.
- 5) コンクリート委員会示方書改訂小委員会報告書，土木学会，pp.16-17，2010.5.
- 6) 岸利治：「ひび割れ制御と耐久設計」を活かすために「品質」を問う，コンクリート工学，Vol.43，No.5，pp.75-80，2005.5.
- 7) 氏家勲：実構造物におけるかぶりコンクリートの吸水性，透水性，透気性の測定方法，コンクリート工学，Vol.32，No.12，pp.43-47，1994.
- 8) 今本啓一，下澤和幸，山崎順二，二村誠二：実構造物の表層透気性の非・微破壊試験方法に関する研究の現状，コンクリート工学，Vol.44，No.2，pp.31-38，2006.2.
- 9) 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.
- 10) 土木学会：施工性能にもとづくコンクリートの配合設計・施工指針（案），コンクリートライブラリー 126，2007.3.
- 11) 早川健司，加藤佳孝：振動締固めによるかぶりコンクリートの充填挙動と品質変動に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，pp.1325-1330，2010.7.
- 12) RILEM Publications S.A.R.L.: Non-Destructive Evaluation of the Penetrability and Thickness of the Concrete Cover, State-of-the-Art Report of RILEM Technical Committee 189-NEC, RILEM Report40, p.49, 2007.5.
- 13) 小野聖久，上東泰：非破壊試験による密実性評価とコンクリートの耐久性に関する考察，土木学会第 60 回年次学術講演会，5-259，2005.9.
- 14) 今本啓一，山崎順二，下澤和幸，永山勝，二村誠二：かぶりコンクリートの透気性に基づく RC 構造物の耐久性能検証に向けた基礎的研究，日本建築学会構造系論文集，第 74 巻，第 638 号，pp.593-599，2009.4.
- 15) 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.
- 16) 水上翔太，早川健司，加藤佳孝，勝木太：含水状態を考慮した構造物かぶりコンクリートの透気性評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，pp.1829-1834，2011.
- 17) 高田良章：コンクリートの中性化に及ぼす各種要因と中性化進行予測に関する研究，芝浦工業大学学位論文，2008.9.
- 18) 鉄筋コンクリート造建築物の耐久性設計施工指針（案）・同解説，日本建築学会，p.58，2004.
- 19) 松田芳範，上田洋，石田哲也，岸利治：実構造物調査に基づく中性化に与えるセメントおよび水分の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.1，pp.629-634，2010.
- 20) 和泉意登志：コンクリートの中性化速度に基づく鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計手法に関する研究，大阪大学学位論文，1991.12.
- 21) 吉田亮，高松俊介，秋山仁志，岸利治：水セメント比および単位水量がコンクリート表層の透気性に与える影響の養生依存性に関する一考察，コンクリート技術シリーズ No.80，pp.379-382，2008.
- 22) 犬飼利嗣，畑中重光，三島直生，金子林爾：視覚的評価方法によるコンクリート中のブリーディング挙動に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.1，pp.609-614，2004.
- 23) 早川健司：構造物かぶりコンクリートの品質管理に関する研究，東京大学学位論文，2011.
- 24) 蔵重勲，西田孝弘，秋山仁志，岸利治：中規模柱試験体を対象とした非破壊評価による表層品質の要因分析，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，pp.1835-1840，2011.
- 25) 豊村恵理，松崎晋一郎，伊代田岳史：養生方法およびその期間を考慮した中性化速度式に関する一検討，土木学会第 66 回年次学術講演会概要集，pp.567-568，2011.

(2011. 11. 7 受付)

A STUDY ON LINKAGE BETWEEN DURABILITY DESIGN AND INSPECTION SYSTEM FOR CARBONATION-CORRODED REINFORCEMENT BASED ON THE AIR PERMEABILITY TEST OF SURFACE CONCRETE

Yoshitaka KATO and Kenji HAYAKAWA

In this research, the relationship between the results of the non-destructive surface air permeability test and the carbonation rate of concrete was examined in order to facilitate smooth information processing from the design stage to the construction, inspection, and maintenance stage. Corrosion of reinforcement due to carbonation was set as the cause of deterioration of the concrete structure. Although the examined experimental conditions were limited, the coefficient of air permeability of surface concrete can be formulated as a function of water-cement ratio, amount of bleeding water, and placement height per layer. The mix proportioning method, inspection system, and initial performance of structural concrete based on the proposed method are discussed.