# 論文 コンクリートの中性化抵抗性と表層透気係数の関連分析に基づいた 品質検査判定基準の提案

蔵重 勲\*1・廣永 道彦\*2

要旨:新設構造物の耐久性検査に対して表層透気試験の導入可能性を調べることを目的に、検査に不可欠な品質の判定基準について検討を行った。本研究では中性化抵抗性に着目し、結合材種類、水結合材比、養生条件によって変化する品質を、促進中性化試験と表層透気試験によって評価し、両結果の対比分析に基づいて促進中性化速度係数を表層透気係数の関数とした予測式を導出した。また、既往の曝露実験結果を用いて促進中性化試験の促進倍率を算出し、大気中における中性化速度係数へと換算することで、設計耐用期間に応じ必要となる表層透気係数を求め、品質判定基準の一案を提示した。

キーワード:耐久性,中性化,品質検査,非破壊試験,判定基準,表層透気係数,養生,設計耐用期間

### 1. はじめに

コンクリート構造物の耐久性に対する信頼性の向上は、設計耐用年数の長期化、維持管理の効率化あるいはメンテナンスフリーといった社会的要請から、今後ますます重要視される課題と考えられる。更新が困難な社会インフラや放射性廃棄物処分施設など一般構造物と比較してより長期の耐久性が要求される構造物の建設に当たっては、耐久性に関与するリスクを十分に把握し、適切な事前対策や管理を実施することが必要となる。その際、設計段階で定められた性能が、施工時の材料品質変動、環境条件、ヒューマンファクター等によって変化するといった施工リスクの管理も重要と考えられる。これについては、従来、材料の品質管理や施工のプロセス管理により対応されているが、より確実な耐久性の検証あるいは説明責任として、完成物に対する品質検査の必要性が近年活発に議論されている「1-4」。

品質検査に適用可能な非破壊試験法として表層透気試験が注目され、中でも RILEM 専門委員会の検討  $^{2)}$ で信頼性の高い方法であると評価された Torrent 法表層透気試験を用いた研究や実務適用の事例が近年増えている。しかしながら、Torrent 法表層透気試験で測定される表層透気係数(以下、kT)とコンクリートの耐久性の関連は定性的には示されているものの、配合や養生等の影響を

取り込んだ汎用的な定量的関係が提示されるには至っていない。そのため、例えばスイスでは性能レベルに応じてkTの推奨値が 2 段階に設定され(0.50,  $2.0 \times 10^{-16} \mathrm{m}^2$ )、それらを判定基準とした試行検査が進められている  $^5$ 。一方,我が国のコンクリート標準示方書(以下,示方書)のように,水結合材比の関数として例示される予測値などを考慮し,比較的自由度を持った耐久性設計が可能な方法においては,設計性能に対応した非破壊試験の判定基準を設定することが現状では難しいと考えられる。

そこで、本研究では、配合や養生によって変化するコンクリートの表層品質を、促進中性化試験および Torrent 表層透気試験によって評価し、中性化抵抗性と kT の関係を定式化した。また、促進試験結果を大気中における中性化速度係数へと変換し、設計耐用期間に応じた品質判定基準に関する一案を提示した。

## 2. 実験概要

## 2.1 供試体諸元

表-1 に供試体作製に用いたコンクリートの配合および 20℃水中養生を行った場合の圧縮強度を,また,表-2 に供試体の養生条件を示す。結合材として普通ポルトランドセメント(密度 3.15g/cm³, 比表面積 3300cm²/g) と高炉セメント(密度 3.04g/cm³, 比表面積 3980cm²/g) を

表-1 供試体作製に用いたコンクリートの配合および圧縮強度

W結合材種類 W/B設定 設定 f'c28 s/a f'c91 Sl.(cm) Air(%) (N/mm<sup>2</sup>) (略号) (%)  $(kg/m^3)$ (%) (N/mm<sup>2</sup>) 40 49.3 47.3 56.5 普通 ポルトランドセメント 50 51.3 40.3 47.4 (N)52.7 31.2 60 36.3 175 21 4.5 48.9 高炉セメント 40 50.2 65.5 B 種 50 50.9 44.9 54.2 (B)60 52.4 31.0 40.7

表-2 供試体の養生条件および分析目的

	略号	養生条件	分析目的
)	1	材齢1日脱型→曝露	早期脱型の影響評価
	5or7	材齢5日脱型→曝露	湿潤養生期間の
	Jor/	(Bは7日, 気温20℃下)	標準値の妥当性検証
	S	材齢5日脱型(Bは7日) →材齢28日までフィルム 被覆による封緘養生→曝露	養生追加による 品質向上効果の評価
	W	材齢1日脱型→材齢28日 まで水中養生→曝露	品質ポテンシャルの 評価

<sup>\*1 (</sup>財)電力中央研究所 地球工学研究所バックエンド研究センター 主任研究員 博士(工学)(正会員)

<sup>\*2(</sup>財)電力中央研究所 地球工学研究所バックエンド研究センター 上席研究員(正会員)

設定し、単位水量を 175kg/m³ としたコンクリートを用いて、10×10×40cm (促進中性化試験用) および 15×15×53cm (表層透気試験用) の角柱供試体を作製した。養生は、示方書 [施工編:施工標準] で示される湿潤養生期間の標準 のに従った条件を、その妥当性検証の目的も含め設定した。その他、養生の良否の影響を評価するために早期脱型および長期封緘養生を、また品質ポテンシャルの評価として材齢 28 日まで 20℃水中養生を行った供試体を用意した。養生後の供試体曝露に当たっては、供試体の 2 側面(10×40cm 面 、15×53cm 面)のみが開放されるようにその他を被覆した。なお、打設、養生、曝露は、すべて気温 20±2℃、相対湿度 60±5%の室内にて行った。

#### 2.2 試験方法

促進中性化試験の促進条件(気温  $20\pm2$ °C,相対湿度  $60\pm5$ %,  $CO_2$ 濃度  $5\pm0.2$ %)などは原則として JIS A 1153 に従ったが、供試体の水和反応や乾燥を十分に進行させる目的で促進試験開始材齢を 91 日とした。

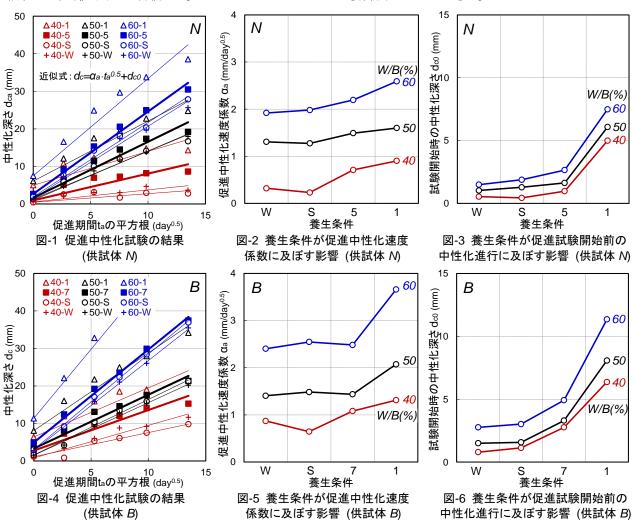
表層透気試験は、測定開始気圧制御型の Torrent 法を採用し(測定開始気圧設定値 30hPa)、促進中性化試験の開始時期に合わせる目的で材齢91日に実施した。測定は、1側面に対して1回行い、1供試体当たり2側面の測定結果から平均値を求めて評価した。

## 3. 実験結果

## 3.1 促進中性化試験

図-1 は、普通ポルトランドセメントを用いた供試体 (以下、供試体 N) の促進中性化試験結果であるが、養生条件によっては促進試験開始前の大気曝露において 既に中性化進行が認められるものがあった。したがって、促進開始時の中性化深さ dco (mm)を切片に取り、促進試験期間 ta (day)の平方根の関数とした直線近似式を求め、促進中性化速度係数  $\alpha a$  (mm/day $^{0.5}$ )を算出した。その結果を図-2 に、また dco の測定値を図-3 にそれぞれ示す。  $\alpha a$  は、W/B が低いほど、養生が良好であるほど小さな値となった。また、dco は、 $\alpha a$  と比較して早期脱型の影響が顕著に表れており、W/B=60%で約 8mm、40%の場合でも5mm程度まで、材齢91日で中性化が進む結果となった。

一方, 高炉セメント B 種を用いた供試体(以下, 供試体 B)の促進中性化試験結果を上記同様に図-4~6 に示す。供試体 Bの  $\alpha$ a および  $d\alpha$  は供試体 N より大きな値を示し,促進試験による評価で従来指摘されるように,高炉セメント使用による中性化抵抗性の低下傾向が確かめられた。また,高炉セメントは比較的水和反応が遅いことから,早期脱型の影響が供試体 N より大きくなることも確認することができた。

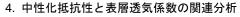


### 3.2 表層透気試験

図-7 および図-8 は、それぞれ供試体 N, B の表層透気試験結果である。表層透気係数  $kT_{91}$  は、養生条件が良いほど小さくなる傾向を示し、早期脱型の場合を除いて供試体Bで明らかに小さな値を示すことが分かった。また、W/Bが  $kT_{91}$ に及ぼす影響は供試体Bにおいてより大きいことが明らかとなった。

このような  $kT_{9I}$  の大小関係は、コンクリートの含水状態に依存するものとして、その影響を考慮する必要がある。これに関して、電気抵抗率を用い

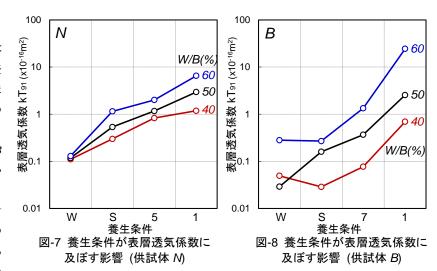
た一評価手法を既報  $^{\eta}$ にて提案しているが、本論では、一様雰囲気に曝露したコンクリートの耐久性と非破壊評価値の関連分析に主眼を置くこととして含水率の影響を無視し、材齢 91 日における表層透気係数  $kT_{91}$  と中性化抵抗性の関係を調べることとした。



### 4.1 促進中性化速度係数と表層透気係数の対比

図-9 および図-10 は、供試体 N, B について  $kT_{91}$  と  $\alpha_a$  の関係をそれぞれ示したものである。両図より、 $kT_{91}$  と  $\alpha_a$  の対応は一対一ではなく W/B によって大きく異なり、表層透気係数を用いた耐久性の評価においては、W/B を因子として考慮する必要性が明らかとなった。また、 $kT_{91}$  に対する  $\alpha_a$  の絶対値は供試体 B でより大きい結果となっており、中性化抵抗性に及ぼす硬化体の化学的特性の影響に基づき、結合材種類も因子として取り扱う必要が確認された。両図の傾向は、中性化抵抗性が、W/B、結合材種類および養生によって変化する表層透気性や化学的特性に大きく左右されることを意味している。

また、 $kT_{91}$ と  $\alpha_a$ の関係を指数関数で近似した場合の相関係数はほぼ全ての条件で 0.9 を上回っており、早期脱



型による品質低下など養生条件に応じた  $\alpha$  の変化に対して、表層透気係数は良好な感度を持って測定され得ることが確かめられた。

図-11 は、それぞれ算定された近似式(1)の係数  $i_1$ およ  $Ui_2$ を、結合材水比 B/W と対比したものである。両係数 はB/Wの指数関数として近似可能であることが明らかと なり、この関係式を式(1)に代入すれば、結合材種類ごと に促進中性化速度係数を kTo1 および B/W で表現した式 (2)を得ることができる。ここで、式(1)の係数 i1 は結合材 種類および B/W ごとに定まる αα のポテンシャルを表し たものと理解でき,式(2)の係数 i ιι は結合材種類固有の αα のポテンシャルを、係数  $i_{12}$  は B/W の影響度を示す指標 として捉えられる。一方、係数 i2 は kT91 の変化に対する αaの感度を表し、係数 i21 および i22 は同様に i2 に対する B/W の影響度と解釈できる。図-11 に示すように、 $i_1$ の値 は供試体Bでより大きく、B/Wの低下に伴って減少する 傾向が認められ、式(2)を用いることによって中性化抵抗 性のポテンシャルや、水結合材比や表層透気性に応じた その変化を定量的に評価できる。

$$\alpha_a = i_1 e^{i_2 k T_{91}} \tag{1}$$

$$\alpha_a = i_{11} e^{\left(i_{12} \frac{B}{W} + i_{21} e^{i_{22} \frac{B}{W} k T_{91}}\right)} \tag{2}$$

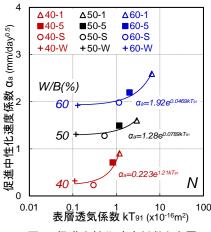


図-9 促進中性化速度係数と表層 透気係数の関係 (供試体 N)

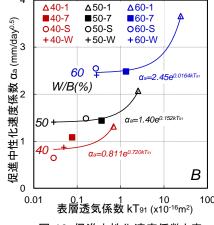


図-10 促進中性化速度係数と表層透気係数の関係 (供試体 B)

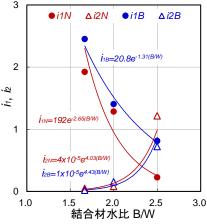


図-11 結合材種類による 結合材水比と係数 i1, i2の関係の相違

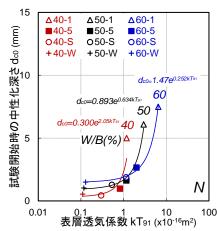


図-12 促進試験開始時の中性化深さ と表層透気係数の関係 (供試体 M)

## 4.2 促進試験開始時の中性化深さと 表層透気係数の対比

図-12 および図-13 は、dcoを前節と同様に  $kT_{9l}$  と比較し、指数関数によって近似した結果である。dco は、早期脱型などにより顕著な品質低下を生じた領域と捉えられ、同値を大気曝露期間の平方根で除すことで、その領域の平均的な中性化速度係数を得ることができる。しかし、大気下におけるごく短期の中性化進行であることから、ここではその時間変化は無視し、材齢のごく初期に生ずる

中性化深さとして評価を単純化することとした。

図-12 および図-13 で分かるように、deoと  $kTg_I$ には強い相関が認められ、式(3)による近似によって算出された係数 $j_I$ および $j_2$ と B/Wの関係は図-14 に示すとおりである。図-11 と同様に両係数と B/W の関係も指数関数で表すことが可能であり、結果として deo は式(2)と同形の式(4)のように表される。

$$d_{c0} = j_1 e^{j_2 k T_{91}} (3)$$

$$d_{c0} = j_{11} e^{\left(j_{12} \frac{B}{W} + j_{21} e^{j_{22} \frac{B}{W} k T_{91}}\right)} \tag{4}$$

## 4.3 W/B と kT の関数とした中性化深さ予測式の導出

促進中性化試験における中性化深さの変化は式(5)のように表され、 $\alpha_a$ および  $d_{c0}$ はそれぞれ式(2)および(4)を用いて算定される。

$$d_{ca} = \alpha_a \sqrt{t_a} + d_{c0} \tag{5}$$

式(5)の有用性を検証するため、同式によって算出された中性化深さと促進中性化試験における実測値を比較した。その結果を結合材種類ごとに、図-15 および図-16 に示す。供試体NおよびBのいずれにおいても、水結合

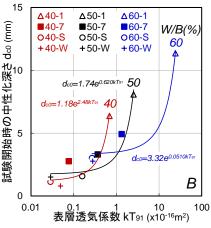


図-13 促進試験開始時の中性化深さ と表層透気係数の関係 (供試体 B)

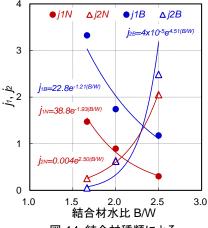
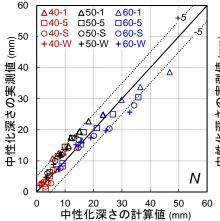
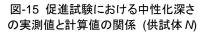


図-14 結合材種類による 結合材水比と係数 j<sub>1</sub>, j<sub>2</sub> の関係の相違





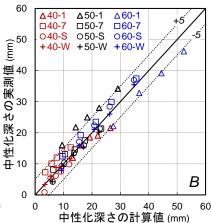


図-16 促進試験における中性化深さの実測値と計算値の関係 (供試体 B)

材比や養生条件によらず、計算値と実測値の関係は概ね ±5mmの誤差範囲内に収まった。

しかし、詳細には中性化深さが小さい場合は実測値が上回り、中性化深さが大きくなると実測値が下回る傾向が分かる。これは、中性化の進行に対して式(5)が、表層から内部への品質に差異の無い均質体を仮定していることに起因する。早期脱型など養生の影響によって表層部で中性化抵抗性が悪化し、養生の良否の影響が緩和される内部ではその変化量が小さいといった現象を反映したものである(図-1 および図-2 参照)。これについては、既報  $^{80}$ にて別途評価方法を示しているが、本論では式(5)のように $\sqrt{t}$  則に基づいた一般的な中性化予測式を便宜的に採用し、判定基準の設定について検討した。

## 5. 表層透気係数判定基準の設定検討

### 5.1 大気中における中性化速度係数への換算

前節の検討により、 $\alpha_a$  は式(2)によって任意の W/B や $kT_{9I}$  から算出可能になった。図-17 および図-18 は、その例として、今回の実験条件である W/B=40、50、60%の他に、それらを内挿する形で 45、55%における  $kT_{9I}$  と  $\alpha_a$  の関係を示したものである。一方、コンクリート構造物の供用

期間 t (year)に対する中性化深さ dc (mm)の変化を式(6)に よって推定するには、促進中性化試験の促進倍率 Ac を算 定し、式(7)を用いて促進試験中性化速度係数 aa  $(mm/day^{0.5})$ を大気中における値  $\alpha'$   $(mm/year^{0.5})$ へと換算 する必要がある。

$$d_c = \alpha' \sqrt{t} + d_{c0} \tag{6}$$

$$\alpha' = \sqrt{365} \, \alpha_a / A_c \tag{7}$$

そこで、本研究では図-19に示すように、20年に及ぶ 実環境への長期曝露試験結果に基づいて定式化され<sup>9)</sup>, 示方書「設計編]においても中性化速度係数の予測式 10) として示されている αρ式 (同図参照) に着目し、これに よる算定値と  $\alpha$  の対応を調べ、促進倍率 Ac を求めた。 なお,供試体 B については,高炉スラグ微粉末置換の影 響をk値によって考慮し、その算出に必要な置換率 $\kappa$ は 一般的な値として 0.43 を用いた。また、W/B と  $A_c$  の関 係の近似には、同図に示すように3つの定数を持つ反比 例式を用いたが、定数 c は促進倍率が無限大、すなわち 大気中での中性化速度係数がゼロとなる W/B を意味し, これは同図の $\alpha_p$ 式を用いて与えた。図-19に示すとおり、 普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートでは 一般に W/B=40%以下で中性化が問題とならないように,

ш<sub>3</sub>

W/B(%)

a'a

供試体NのW/B=40%における促進倍率 は他に比べて大きな数値として表され た。その他の条件では、供試体 N でや や上回るが Acは 20 倍程度となった。

以上の検討から求めた大気中におけ る換算中性化速度係数 a'と kTo, の関係 を, 結合材種類別に図-20 および図-21 に示す。同図には, 各養生条件におけ る  $kT_{g_I}$ の実測値に対応する  $\alpha$ 'も表示し ており, 今回の実験条件範囲内の結果 ではあるが, 実際に生じ得る養生条件 による表層透気性や中性化抵抗性の変

 $Ac = 365^{0.5} \alpha a / \alpha_p$ 

 $\alpha_{p}=-3.579+9.0(W/B)^{*}$ 

α (mm/day<sup>0.5</sup>), αρ (mm/year<sup>0.5</sup>)

 $(W/B)^*=(W/B)/\{1-(1-k)r_s\}$ 

k:混和材定数(0.7)

(W/B)\*:有効水結合材比

rs:混和材置換率(0.43)

近似式: Ac=a+b/(W/B-c)

定数c: 0.3967(N), 0.3455(B)

水結合材比 W/B (%)

図-19 水結合材比に応じた

中性化促進倍率の算定方法

160

140

**⋞**120

40

20

n 30

動幅を定量的に評価することができた。これを見れば、 W/B が大きいほど,また高炉セメントを使用した場合に, 比較的中性化抵抗性に及ぼす養生の影響が大きいこと が明らかであり、その変化を表層透気試験によって検知 ならびに定量評価できることが分かる。

## 5.2 設計耐用期間に応じた水結合材比や養生の設定と 表層透気係数の判定基準に関するケーススタディ

式(6)に式(2), (4), (7)を代入することで、大気中におけ る中性化の進行予測が可能となったことから, コンクリ ート構造物の中性化に伴う鋼材腐食を対象にケースス タディを行った。表-3 に示すように、かぶり c を 40mm とした場合を想定し, 示方書 [設計編] に従った方法で  $\Delta c_e$  および  $c_k$  を考慮して, 鋼材腐食発生限界深さ  $y_{lim}$  (mm) を求めた。さらに、式(8)のように、ylim を安全係数 γi, γcb, γε, γρ および環境作用の程度を表す係数 βε (本検討では乾 燥環境を想定)で除すことにより、中性化深さの判定基 礎値  $y_i$  (mm)を算出した。

$$y_j = y_{lim}/\gamma_i \gamma_{cb} \gamma_c \gamma_p \beta_e \tag{8}$$

また, 設計耐用期間 td (year)は, yi に中性化が達する時と して式(9)で表現した。

W/B(%)

**α'**a (mm/day<sup>0.5</sup>)

3

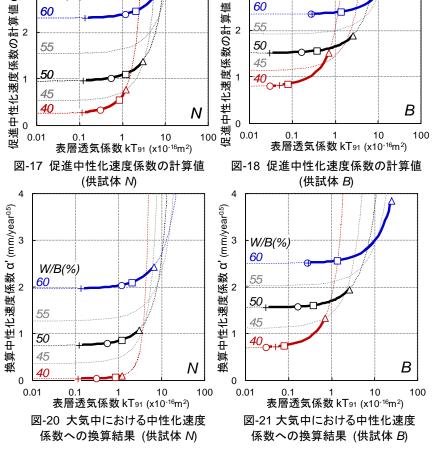


表-3 ケーススタディに用いた諸元値

諸元	値
かぶりc	40 mm
施工誤差 $\Delta c_e$	4 mm (0.1 <i>c</i> )
かぶりの設計値 cd	36 mm
中性化残り Ck	10 mm
鋼材腐食発生 限界深さ ylim	26 mm
$\gamma_i$	1.0 (一般)
γcb	1.15 (一般)
$\gamma_c$	1.0 (一般)
$\gamma_P$	1.15 (予測精度)
$eta_e$	1.6 (乾燥環境)
中性化深さの 判定基礎値 y <sub>j</sub>	12.3 mm

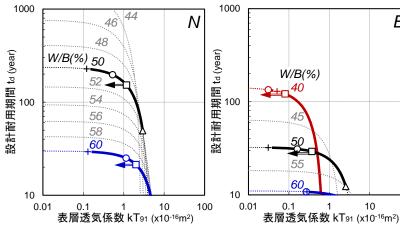


図-22 設計耐用期間に応じた表層 透気係数の判定基準例 (供試体 M)

図-23 設計耐用期間に応じた表層 透気係数の判定基準例 (供試体 B)

10

В

$$t_d = \left(\frac{y_j - d_{c0}}{\alpha'}\right)^2 \tag{9}$$

同式を用いて W/B ごとに td と  $kT_{91}$  の関係を調べた結果 を,結合材種類別に図-22 および図-23 に示す。供試体Nでは、設計耐用期間を 60 年とした場合、W/B=56%の条 件でおよそ  $0.5 \times 10^{-16} \text{m}^2$  以下であれば満足されることに なる。しかし、養生が不十分であったり、W/B が過大な コンクリートが打込まれた場合は、より大きな kT が測 定されることになり、耐久性の不足を検知することが可 能となる。ただし、ここでは表層透気試験の測定精度や 再現性といった影響因子や構造物中の品質のばらつき は考慮に入れていない。この点は, 安全係数での考慮や 測定方法の最適化など、今後の課題として残る。また、 供試体 B では中性化抵抗性が比較的劣るため,表-3のよ うな条件では、W/B=50%でも 30 年程度の設計耐用期間 しか見込めず、養生不良の場合には 10 年程度になって しまう可能性が示唆された。しかし一方で, 今回のケー ススタディで想定した乾燥環境ではなく, 湿潤雰囲気に おける高炉セメントコンクリートの中性化は普通ポル トランドセメントコンクリートと比較し遜色ないとの 報告がある11)。竣工検査における品質判定基準の設定に 当たっては, 設計における要求性能との対応を考慮する ことが基本と考えられるが、上記のような実現象を設計 や判定基準に取り込むことも一課題とし挙げられる。

### 6. まとめ

本論では、中性化抵抗性と表層透気係数の対比分析に 基づき両者の関係を定式化し、配合や養生により変化す る品質を非破壊試験によって定量評価する方法を示し た。また, 導出した関係式を用いて, 示方書[設計編] の考え方に従った品質判定基準の基礎値を算定し、設計 や検査への適用方法論を示した。

#### 謝辞

供試体の作製に用いたレディーミクストコンクリートは 住友大阪セメント (株) よりご提供頂きました。ここに記 しまして謝意を表します。また、本研究は土木学会 335 委 員会(構造物表層のコンクリート品質と耐久性能検証シス テム研究小委員会,委員長:岸利治東京大学教授)におい て実施した共通試験に関連し、行ったものです。同委員会 での議論は本研究の遂行にとって大変有意義であり、役立 ちました。委員長を始め、幹事団および委員の各位に深く 感謝申し上げます。

### 参考文献

- 1) Long term behaviour of low and intermediate level waste packages under repository conditions -Results of a co-ordinated research project 1997-2002, International Atomic Energy Agency, IAEA-TECDOC-1397, 2004
- 2) R.J. Torrent and L. Fernandez Luco: 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', 2007
- 3) 構造物表面のコンクリート品質と耐久性能検証システム 研究小委員会 (335 委員会) 成果報告書, 土木学会コンク リート技術シリーズ80,2008
- 4) 歴代構造物品質評価/品質検査制度研究小委員会(216 委 員会) 成果報告書, 土木学会コンクリート技術シリーズ 87, 2009
- 半井健一郎, 蔵重勲, 岸利治: かぶりコンクリートの透気 性に関する竣工検査-スイスにおける指針-, コンクリー 卜工学, Vol.49, No.3, pp.3-6, 2011
- 6) 2007年制定コンクリート標準示方書[施工編], 土木学会, pp.127, 2008
- 7) 蔵重勲,廣永道彦:透気係数の含水依存性を考慮したコ ンクリート表層品質の非破壊評価法の一提案,セメン ト・コンクリート論文集, No.65, pp.225-232, 2012
- 8) 蔵重勲,廣永道彦:養生条件が異なるコンクリートの促 進中性化速度係数と非破壊測定した表層透気係数の相関, 土木学会第 65 回年次学術講演会講演概要集, V-305, pp.609-610, 2010
- フライアッシュを混和したコンクリートの中性化と鉄筋 の発錆に関する長期研究(最終報告), 土木学会コンクリ ートライブラリーNo.64, 1988
- 10) 2007 年制定コンクリート標準示方書[設計編], 土木学会, pp.54-55, 2008
- 11) 松田芳範, 上田洋, 石田哲也, 岸利治: 外部環境にある既 設構造物の中性化深さに関する一考察、コンクリート工学 年次論文集, Vol.32, No.1, pp.629-634, 2010