

論文 ダブルチャンバー透気性試験・ダブルチャンバー透水性試験による表層コンクリートの非破壊検査法の技術開発

豊福 俊泰*1・高橋 典子*2・永松 武則*3・細川 土佐男*4

要旨：開発した豊福透水試験機法は、「ダブルチャンバー透気性試験(吸気圧法)測定の一箇所で、同じく構造物下面を含む全方位の透水性が、水頭高さ 55kPa の水圧状態において、20 分で測定可能であるダブルチャンバー透水性試験法(送水圧法)」を実現化したものである。性能確認試験の結果、この方法は、ダルシー浸透流相当の試験可能であり、透水性指数 P 値(m/sec) は、土木学会コンクリート標準示方書規定の透水係数や表層コンクリートの品質(中性化深さ等)との強い相関が認められ、この試験機法の実用性が検証された。
キーワード：透水性試験, 透水性指数, 透水係数, 透気性試験, 透気性指数, 非破壊検査

1. はじめに

現在、経済成長期に建造された膨大なインフラの経年劣化の進行に伴い、表層コンクリートの品質を調査する非破壊検査法の開発が、急務となっている。特に、繰返し雨水・塩水、乾燥等の影響を受ける水掛かりの箇所では、劣化の進行が著しく、水密性(透水係数)や耐久性に関する品質を高精度の非破壊検査法によって確認する必要性が高く、各国で研究が進められている。

現場で表層コンクリートの透気性を非破壊検査する方法としては、R. Torrent によって提案され、わが国では 2002 年に豊福が「構造物のコンクリートの圧縮強度推定方法」として技術開発したダブルチャンバー透気性試験法(吸気圧法、図-1)²⁾が、その後諸機関でも種々の研究が進められ、実用化されるに至っている。

一方、水密性(透水性)の現場試験法としては、RILEM Test Method No.11.4 の Karsten Tube(水頭高さ 50cm)、横浜国立大学開発の表面吸水試験法(水頭高さ 30cm)などがあるが、いずれも加圧不能であり、構造物のあるあらゆる箇所において加圧測定可能な透水性試験法の実現が、世界中で待望されていた。そこで、豊福らは、2013 年に「ダブルチャンバー透気性試験機」で測定した同一箇所で、同じく構造物下面を含む全方位の透水性が、水圧状態(最大 80kPa、基準 55kPa)において、20 分程度で測定可能であるダブルチャンバー透水性試験法(送水圧法、図-2)³⁾を、技術開発したものである。

2. ダブルチャンバー透気性・透水性試験法の概要

2.1 ダブルチャンバー透気性試験法

ダブルチャンバー透気性試験法は、測定部が内側チャンバーと外側チャンバーを有する構造(図 1)からなり、

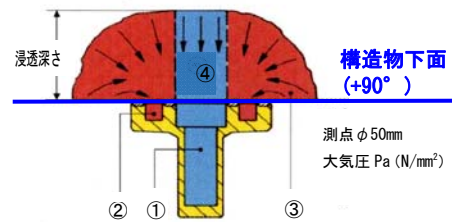


図-1 ダブルチャンバー透気性試験の試験原理

透気性は、内側チャンバーの圧力から式(1)によってコンクリートの透気性指数 $k_t(\times 10^{-16}m^2)$ 、以後 K 値とする)を求め品質を評価するものである²⁾。

$$k_t = 4 \left(\frac{V_c (dP_i / dt)}{A (P_a^2 - P_i^2)} \right)^2 \frac{\mu P_a}{\varepsilon} \int_{t_0}^t \left[1 - \left(\frac{P_i}{P_a} \right)^2 \right] dt \quad (1)$$

ここで、 V_c ：内部チャンバーと接続要素(ホース等)の容積(m^3)、 ε ：コンクリートの空隙量 (m^3/m^3)、 P_i ：内部チャンバーの圧力(N/m^2 、図-1の①)、 P_a ：大気圧(N/m^2)、 A ：仮定された栓流の断面積 (m^2 、図-1の④)

2.2 豊福透水試験機(ダブルチャンバー透水性試験)法

(1) 試験原理

豊福透水試験機(図-2、写真-1)は、測定部が内側チャンバーと外側チャンバーを有する構造からなり、透水性は、内側チャンバーの透水量によって評価される³⁾。外側チャンバーの吸引圧力(真空圧 70 kPa、図-2の②)とシール材によりダブルチャンバーが構造物の表面に完全に密着するため、内側チャンバーからの水の流出(同①)が防止され、結果として内側チャンバー下に透水(浸透)の流れ(同③)が形成される。この低水圧下(100 kPa 程度以下)の 1 次元の水の流れは、ダルシー浸透流となること

*1 九州産業大学 工学部都市基盤デザイン工学科教授 工博 (正会員)

*2 九州産業大学大学院 工学研究科産業技術デザイン専攻博士後期課程 修(工)

*3 九州産業大学 工学部都市基盤デザイン工学科技能員 (正会員)

*4 九州産業大学 工学部都市基盤デザイン工学科教授 博(工)

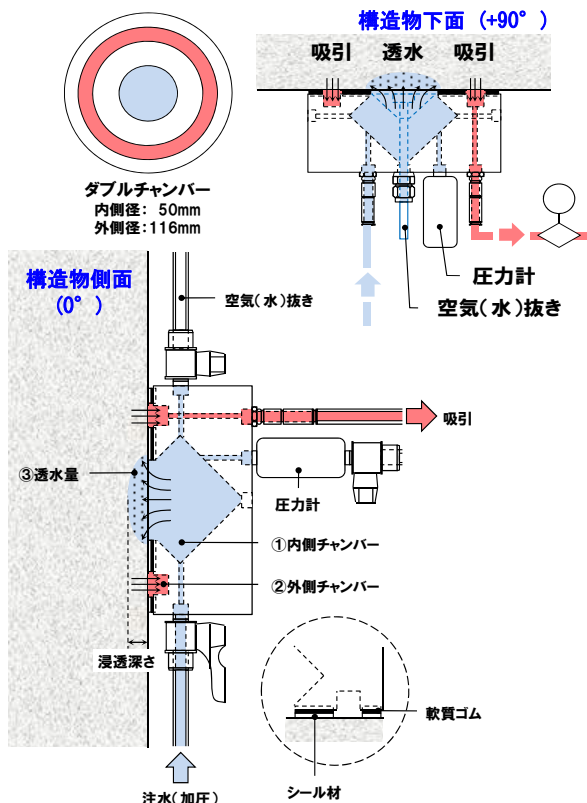


図-2 ダブルチャンバー透水性試験の試験原理

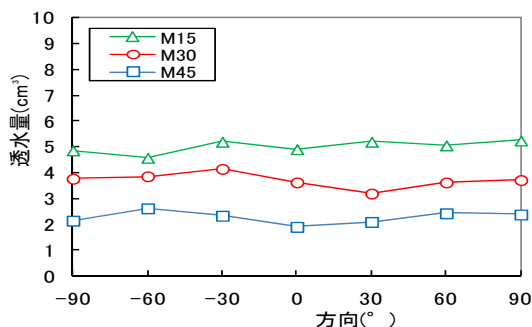


図-3 方向と透水量(供試体の種類別, 透水水圧 55kPa, 透水時間 20分)

を伊藤らが検証⁴⁾しており、後述するように、これに相当する試験条件(透水水圧 55kPa, 透水時間 20分)とすると、透水(浸透)量 $w(\text{cm}^3)$ が式(2)より、透水性指数 $P(\text{m/sec}$, 以後 P 値とする)が式(3)より求められる。

$$w = w_1 - w_0 \quad (2)$$

$$P = \frac{G\rho w^2}{2tA^2P_u} \times 10^{-4} \quad (3)$$

ここで、 w_1 : 透水終了時の水量(cm^3)、 w_0 : 透水開始時の水量(cm^3)、 G : 重力加速度(m/sec^2)、 ρ : 水の単位容積質量(g/cm^3)、 t : 透水時間(sec)、 A : 内側チャンバーの断面積(cm^2)、 P_u : 透水水圧(kPa)

試験機の構造は、測定面の角度に拘わらず内側チャンバー内に空気泡が残留しないようにするため、構造物上面(鉛直下向き方向: $-90^\circ \pm 45^\circ$)・側面(水平方向: $0^\circ \pm 45^\circ$)の場合、内面を傾斜させエア抜き用流路を

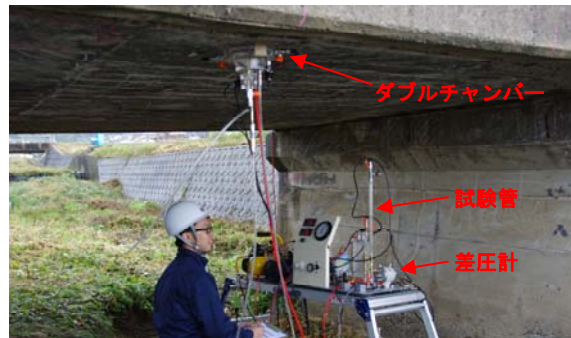
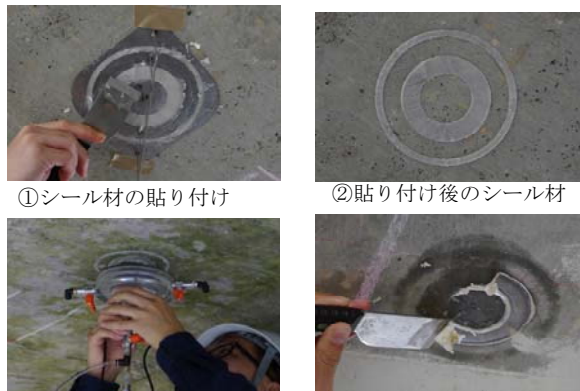


写真-1 ダブルチャンバー透水性試験の試験装置



③シール材にチャンバーを吸着 ④測定後、シール材を剥がす
写真-2 漏水無しに測定後、きれいに剥がせるシール材

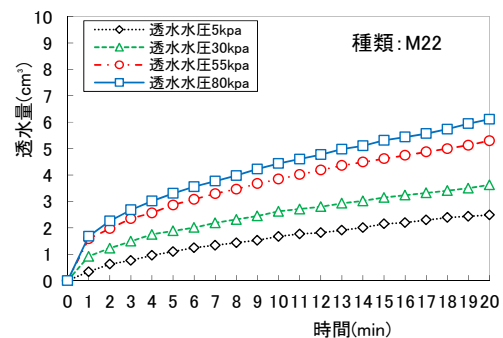


図-4 透水時間と透水量(透水水圧別, M22, 方向-90・0・90平均)

設けた構造, 構造物下面(鉛直上向き方向: $+90^\circ \pm 45^\circ$)の場合, エア抜きパイプを取付けて流路を設けた構造(図-2)としている。さらに、水圧状態で漏水なしに測定可能とするため、コンクリート表面に貼付けたシール材に、チャンバー部表面の極軟質ゴムを接することにより、真空圧で密着させる方法としている(写真-2)。シール材は、「漏水なしに測定でき、測定後、容易にきれいに剥がせるもの(保水性極軟質粘土)」を、種々の試験によって選定した。水量は、試験管の水頭変化量を差圧計で測定する方法(写真-1)、水圧は、圧力計で測定する方法(図-2)としている。

(2) 試験方法の検討

試験方法は、粗骨材分布の影響を受けないように、圧縮強度 15, 22, 30, 45 kN/mm^2 の普通コンクリート(表-1)のモルタル, それぞれ普通 15 (M15), 普通 22 (M22), 普通 30 (M30), 普通 45 (M45) を用いた $\phi 15 \times 4\text{cm}$

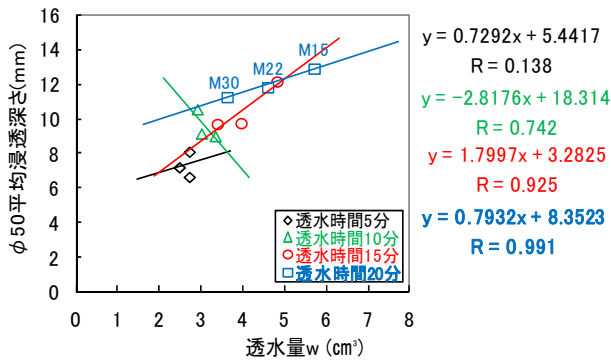


図-5 透水量と ϕ 50mm 平均浸透深さ (透水時間別, 水圧 55kPa, M15・M22・M30, 方向-90・0・90° 平均)

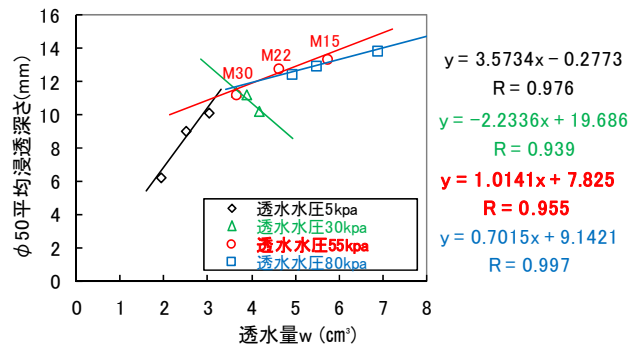


図-6 透水量と ϕ 50mm 平均浸透深さ (透水水圧別, 透水時間 20 分, M15・M22・M30, 方向-90・0・90° 平均)

表-1 試験計画

コンクリートの種類 (注)	水セメント比 W/C (%) (W/C, kg/m ³)	材齢	供試体の種類 (寸法, 測定面)	暴露条件 (測定面の養生方法)
普通30W185	61(185/304)	1年	・柱部材(高さ60×幅50×20cmの片側側面) ・床部材(高さ20×幅60×50cmの上面・下面)	・屋外暴露 (空気中, 屋内暴露約3か月後屋外暴露) ・屋外暴露 (5日間湿潤養生, 屋内暴露約3か月後屋外暴露)
普通30W164	54(164/304)	2年		
普通15	87(166/192)	2年 3年 4年 5年 6年 7年	・柱部材・床部材から採取した ϕ 10×20cmのコア	
普通15	86(165/192)			
普通22	68(165/243)			
普通30	52(163/314)			
普通40	45(172/383)			
普通45	38(180/474)			
普通45	37(179/484)			
普通60	30(170/567)			
普通60	29(170/597)			

(注)

・スランブ: 8 ± 2.5 cm, 空気量: $4.5 \pm 1.5\%$, 粗骨材の最大寸法: 25mm, セメント: 普通ポルトランドセメント, 細骨材: 玄界灘産海砂+宍道沖産海砂, 粗骨材: 古賀産碎石, 混和剤: AE減水剤, 高性能AE減水剤(普通60のみ)を使用し, 単位セメント量C変化のコンクリート

・普通30W185: 普通30の $W=164\text{kg/m}^3$ を $W=185\text{kg/m}^3$ ($C=303\text{kg/m}^3$ で一定) とし, スランブが変化のコンクリート

・普通30W164: 普通30の $W=164\text{kg/m}^3$ のコンクリート(スランブ: 8 ± 2.5 cm)



写真-3 柱部材(左), 床部材(右)の屋外暴露状況 (上面が雨掛かり面, 試験面 2 箇所測定後コア抜き)

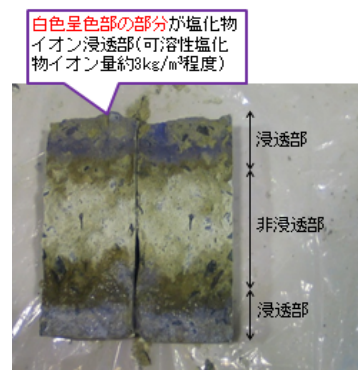


写真-4 塩化物イオン浸透深さ試験

の供試体で透水性試験を行って検討した。試験結果(図-3～図-6)から, 透水量は, 測定方向の影響は認められず, 透水時間が長く, 透水水圧(最大 80kPa)が大きく, 供試体の品質が低強度 (水セメント比が大, M15)であるほど, 大きくなる相関が認められる(図-3, 図-4)。また, 透水量と内側チャンバー内の ϕ 50mm 平均浸透深さ(供試体の中央部を割裂し測定)との関係は, 透水時間が 5～10 分, 透水水圧が 5～30kPa の場合にはばらつきがあるが, 透水時間が 15 分以上, 透水水圧が 55kPa 以上の場合, 供試体の品質が低強度で, 透水水圧が大きいくほど, 平均浸透深さが大きくなる相関 (図-5, 図-6, 相関係数 $R > 0.9$, 普通 15, 22, 30 のモルタル) が認められる。そこで, この試験法では, ダルシー浸透流 (1 次元の水の流れ) に相当する透水量が試験できると判断される透水水圧 55kPa ($\approx 80 \times 0.7$), 透水時間 20 分を試験基準と定めた。

3. 性能確認試験

3.1 試験概要

性能確認試験としては, コンクリートの水密性 (透水係数), コア圧縮強度, 中性化 (中性化深さ), 塩害 (塩化物イオン浸透深さ) を評価する可能性を検討した (表

-1)。供試体は, 実構造物を代表するように柱部材(鉛直部材), 床部材 (水平部材) とし, 単位セメント量変化の配合 (スランブ一定, 9 配合), 単位水量増加の配合 (単位セメント量一定でスランブ変化, 1 配合) の計 10 配合のレディーミクストコンクリートを用いて製作し, 材齢, 暴露条件, 養生条件を変化させた (写真-3)。試験面は, 柱部材側面, 床部材上面, 床部材下面のそれぞれ 2 箇所とした。高周波容量式水分計 (測点 ϕ 50mm 中の 3 箇所) で水分率 (M_o , %), ダブルチャンバー透気性試験機で透気性指数 (K 値, $\times 10^{-16}\text{m}^2$), ダブルチャンバー透水性試験機で透水性指数 (P 値, $\times 10^{-10}\text{m/s}$, 透水圧力 55kPa とし透水時間 20 分で 1 点測定) を順次測定後に, これらの箇所からコア (ϕ 10×20cm) を採取して, 圧縮強度 (JIS A 1108)試験, 中性化深さ (JIS A 1152)試験を行った。さらに, これらの近接箇所からコア 1 個を同時に採取し

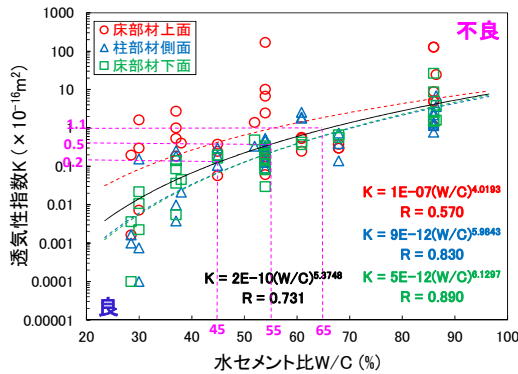


図-7 水セメント比 W/C と透気性指数 K 値

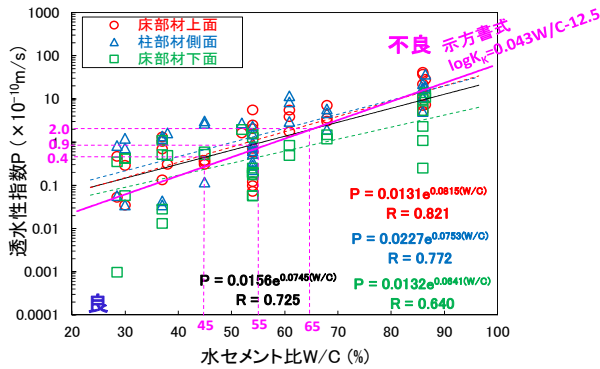


図-8 水セメント比 W/C と透水性指数 P 値

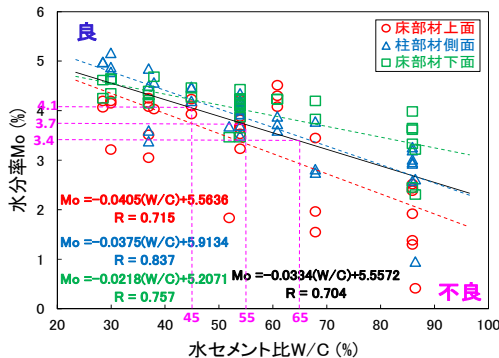


図-9 水セメント比 W/C と水分率 Mo

て、塩化物イオン浸透深さ試験（写真-4、JSCE-G 572-2010、濃度 10%の塩化ナトリウム水溶液中に 10 日間浸漬後、割裂面に 0.1 mol/l 硝酸銀溶液を噴霧し、変色境界までの平均深さを測定）を行った。

3.2 試験結果と考察

(1) 水密性（透水係数、水セメント比）との関係

試験結果から、水セメント比 W/C と非破壊検査値との関係を部材別に求めると、W/C が大きいほど、K 値が大きくなり（図-7、正の累乗式）、P 値が大きくなり（図-8、正の指数式）、Mo が小さくなり（図-9、負の直線式）になっている（これ以後、床部材上面は赤、同下面は緑、柱部材側面は青、全体は黒で表記とし、相関性を検証するため、直線式、累乗式、対数式、指数式のうち最も相関が強い関係式と相関係数 R に加え、良側と不良側を表記する）。これらと比較すると、水セメント比との相関が全体的に強い順は、K 値（相関係数 R=0.731）、P 値（R=

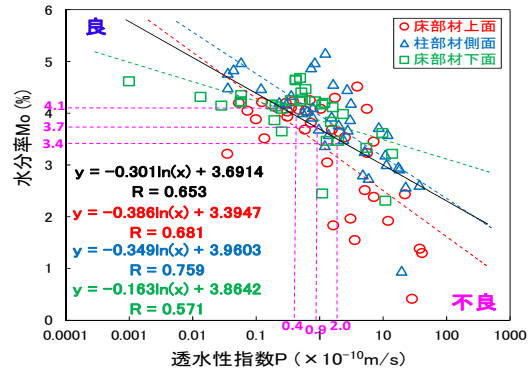


図-10 透水性指数 P と水分率 Mo

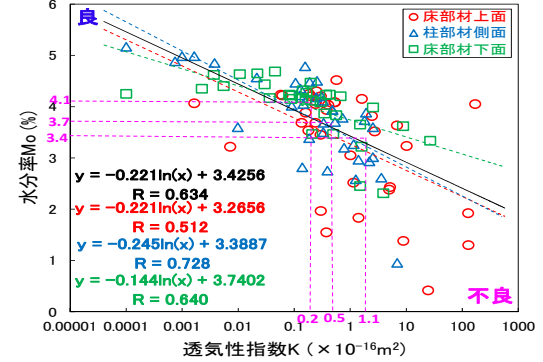


図-11 透気性指数 K と水分率 Mo

0.725), Mo (R=0.704) となっており、また、Mo は P 値（図-10、R=0.653）で、次に K 値（図-11、R=0.634）の順で代表されているとみなされる。

また、床部材は、上面（ブリーディング面、雨掛かり面）の K 値が高く Mo が低い、下面（雨掛かりなし面）の K 値・P 値が低く Mo が高くなっており、柱部材側面は、P 値が高い傾向が認められる。

一方、コンクリート標準示方書[設計編]¹⁾の 4 編:使用性に関する照査 4 章で、透水係数 K_k から水密性に対する照査を行うことが規定されており、この試験方法は米国開拓局の方法(アウトプット法)または DIN 1048(インプット法)によるとしている。ここで、既往の研究結果に基づいて得られた K_k と W/C との関係は、式(解 4.3.1) $\log K_k = 4.3 \cdot W/C - 12.5$ となることが示されており、図-8 に併記したように、本試験結果の P 値と W/C との関係は式(4)で表され、全体的に両者は適合している。

$$\log P = 3.24 \cdot W/C - 1.81 \quad (n=162, R=0.725) \quad (4)$$

また、式(5)は P 値と示方書式の透水係数 K_k の計算値との関係であり、P 値は水セメント比 55%程度に相当する $1 \times 10^{-10} \text{m/s}$ 付近で K_k と一致しており、水密性（透水あるいは透湿に対する抵抗性を表す品質）を表す指標（透水係数）であると判断される。

$$K_k = 0.8044P^{0.6982} \quad (n=162, R=0.725) \quad (5)$$

さらに、土木学会「コンクリート標準示方書[施工編]」では、コンクリートの最大水セメント比 W/C (%) が、水密性の場合：55%、耐久性の場合：65%、海洋コンク

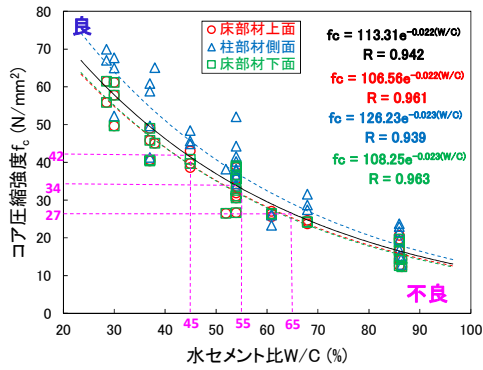


図-12 水セメント比 W/C とコア圧縮強度

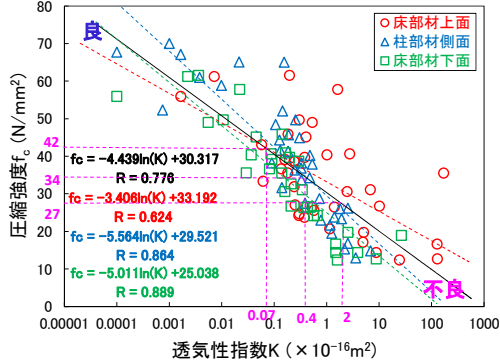


図-13 透気性指数 K とコア圧縮強度 f_c

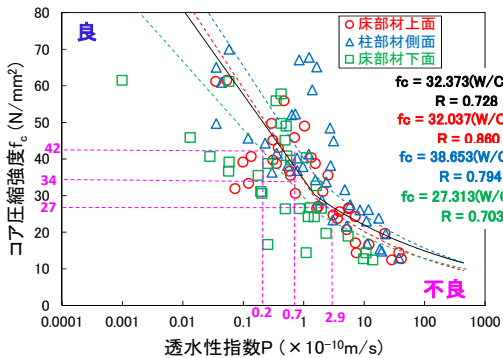


図-14 透水性指数 P とコア圧縮強度 f_c

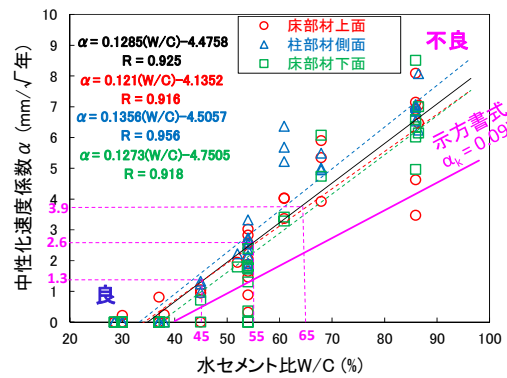


図-15 水セメント比 W/C と中性化速度係数 α

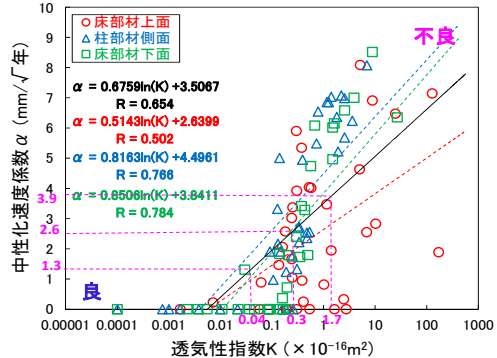


図-16 透気性指数 K と中性化速度係数 α

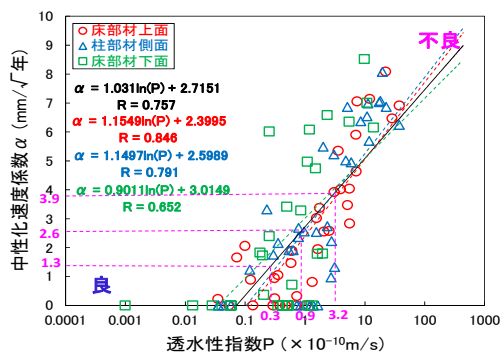


図-17 透水性指数 P と中性化速度係数 α

リートの耐久性および鋼材を保護する性能の場合（耐久性から定まる最も過酷な環境区分である飛沫帯および干満帯）：45%と、それぞれ規定されている。そこで、これらの規定 W/C(%)=45, 55, 65 についても図-7～図-11 に併記したが、それぞれに対応する K 値=0.2, 0.5, 1.1, P 値=0.4, 0.9, 2.0, Mo=3.4, 3.7, 4.1 となっている。

(2) コア圧縮強度との関係

周知のように、コア圧縮強度 f_c (N/mm²) は、セメント水比 C/W と直線関係にあるが、図-12 から、水セメント比 W/C と累乗式関係 ($R=0.942$) にあることが示されている。K 値, P 値と f_c との関係は、それぞれ図-13 (負の対数式, 相関係数 $R=0.776$)、図-14 (負の累乗式, $R=0.728$) に示す通りであり、K 値との相関が大である理由は、コア圧縮強度が空気量（空隙の多さ）と負の相関が強いためであると推察される。規定 W/C (%) = 45, 55, 65 に対応する $f_c=42, 34, 27$ であり、これらはそ

れぞれ K 値=0.07, 0.4, 2.0, P 値=0.2, 0.7, 2.9 となっている。部材別の比較では、P 値は、コア圧縮強度が同一であっても、柱部材側面が大であり、床部材上面、床部材下面の順に小さくなる傾向が認められ、水セメント比の場合と同様に、部材別で差が生じている。

(3) 中性化（中性化深さ）との関係

中性化深さ Cd (mm) は、コンクリート標準示方書[設計編]⁶⁾で、中性化速度係数 α_k を設定し、 \sqrt{t} 則から $Cd = \alpha_k \sqrt{t}$ 式によって中性化に対する照査を行うこと、また、 α_k の値は、既往の研究結果に基づいて得られた有効水結合材比 W/B(ここに、B:単位体積あたりの有効結合材の質量)との関係から、(解 2.1.2)式 $\alpha_k = 9.0W/B - 3.57$ となることが規定されている。本試験結果の場合、コアの中性化速度係数 α (mm/ $\sqrt{\text{年}}$)は、水セメント比 W/C と直線関係にあり(図-15)、規定 W/C(%)=45, 55, 65 に対応する $\alpha = 1.3, 2.6, 3.9$ であり、これらはそれぞ

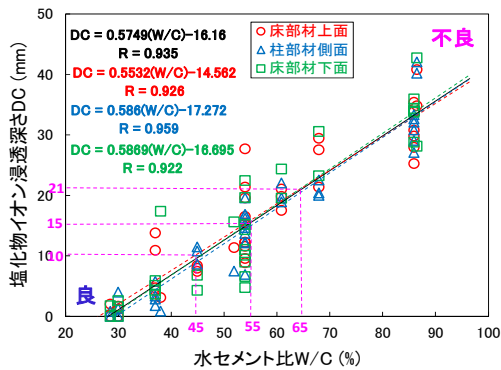


図-18 水セメント比 W/C と塩化物浸透深さ DC

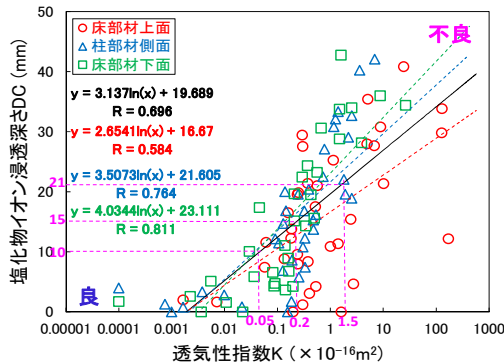


図-19 透気性指数 K と塩化物浸透深さ DC

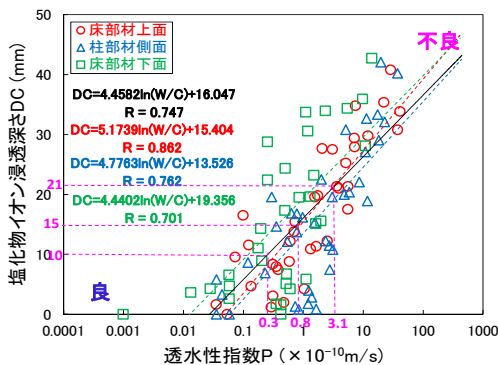


図-20 透水性指数 P と塩化物浸透深さ DC

れ K 値=0.04, 0.3, 1.7(図-16), P 値=0.3, 0.9, 3.2(図-17)となっている。図-15 には、 α に(解 2.1.2)式を併記したが、これに比べて α の値は全体的に約 40%大きく測定されており、環境作用の程度を表す係数 1.4 とみなされ、中性化深さ C_d (mm)は、式(6)で求められる。

$$C_d = \gamma_{cb} \cdot \alpha \cdot \sqrt{t} = \gamma_{cb} (12.9W/C - 4.48) \sqrt{t} \\ = \gamma_{cb} (1.03 \cdot \ln(P) + 2.72) \sqrt{t} \quad (6)$$

ここに、 γ_{cb} : 予測の精度に関する安全係数

この式(5)に表したコアの中性化速度係数 α と P 値との関係は、図-17 (正の対数式, $R=0.757$) から求めたものである。P 値は、K 値よりコアの中性化深さとの相関が強くなっているが、この理由は P 値が環境(気象, 含水, 透水)条件を表しているためであると推察される。

部材別の比較では、P 値は、柱部材側面が大きく、床部材上面、床部材下面の順に小さくなっている。中性化は、環境条件として相対湿度 50~70%において最

も進行することが知られているが、柱部材側面は、これに近い環境条件にあるのに対し、床部材上面は、雨天時に水が浸透し空隙が水で充填される。逆に、床部材下面は水の供給が全くなく乾燥するため、中性化深さ C_d が小さくなっているとみなされる。

(4) 塩害(塩化物イオン浸透深さ)との関係

塩化物イオン浸透深さ DC (mm)は、中性化深さと同様に、水セメント比 W/C と直線関係(図-18, $R=0.935$)にあり、P 値との関係は、図-20(正の対数式, $n=109$, $R=0.747$, 式(6))に示す通りである。

$$DC = 4.46 \cdot \ln(P) + 16.1 \quad (7)$$

また、規定 W/C (%)=45, 55, 65 に対応する $DC=10, 15, 21$ であり、これらはそれぞれ K 値=0.05, 0.2, 1.5, P 値=0.3, 0.8, 3.1 となっている。含水(透水, 透気)要因である P 値は、K 値より塩化物イオン浸透深さとの相関が強く、中性化深さと同様に影響が大となっている。

部材別の比較では、前述のように、P 値が同一であっても、コア圧縮強度 f_c が低く(図-14)、中性化速度係数 α が大きい(図-17)傾向がある床部材下面は、塩化物イオン浸透深さが大きい(図-20)傾向が認められる。

5. まとめ

開発したダブルチャンバー透水性試験法、透気性試験法は、性能確認試験の結果、水密性、コア圧縮強度、中性化、塩化物浸透性との強い相関性が認められた。これらの室内試験のほか実際に多数の橋梁においての品質調査も行っており、表層(かぶり)コンクリートの水密性、耐久性の非破壊検査法としての実用性が検証された。

謝辞

本研究に関しては、富士物産(株)、(株)横河ブリッジホールディングス総合技術研究所春日井俊博所長、(株)麻生建設コンサルティング事業部彌永育代さんから多大なるご協力を頂きました。ここに、深く感謝する次第です。

参考文献

- 1)土木学会：2012 年制定コンクリート標準示方書[設計編]、[施工編]、2013.3
- 2)豊福俊泰：構造物のコンクリートの圧縮強度推定方法、特許公報(B2)、特願 2002-64329、特許第 4009118 号、富士テック株式会社・学校法人中村産業学園、2007.11.14
- 3)豊福俊泰、白川敏夫、彌永育代：コンクリート構造物の透水性試験に基づく品質評価方法、特許公報(B1)、特願 2013-110971、特許第 5611417 号、学校法人中村産業学園、2014.9.12
- 4)伊藤義也・越川茂雄：ダルシー浸透流によるコンクリートの透水試験方法の提案、コンクリート工学年次論文集, Vol.18, No.1, pp.921-926, 1996