

論文 ダブルチャンバー透水性・透気性試験機による表層コンクリートの非破壊検査法に関する研究

高橋 典子*1・白谷 祐太*4・豊福 俊泰*2・永松 武則*3

要旨: 表層コンクリートの非破壊検査方法を目的として開発したトヨフク透水試験機法は、「ダブルチャンバー透気性試験（吸気圧法）測定」の同一箇所、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）を実現したものである。性能確認試験の結果、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たため、既設橋梁の RC 床版において透水性試験と透気性試験の現地調査を実施し、表層品質の評価法の有効性について研究した。

キーワード: 透水性試験, 透水性指数, 透気性試験, 透気性指数, 非破壊検査, ダブルチャンバー

1. まえがき

周知のように、コンクリート構造物の経年劣化の進行に伴い、かぶりコンクリートの品質（水密性、耐久性、コア圧縮強度など）を判定する非破壊検査法の開発が課題となっている。内部コンクリートは、外部からの環境影響を殆ど受けないが、繰返し雨水・塩水、乾燥等の影響を受ける環境条件下にある箇所（橋台、橋脚、橋桁、RC 床版、壁高欄、建物外壁部など）の表層コンクリートでは特に、劣化の進行が著しく、透水性、透気性に関する性能の非破壊検査法の確立が急務となっている。

このため、豊福らは高精度の非破壊検査法を開発する研究を平成 8 年度以来進めており、開発・製品化した「ダブルチャンバー透水性（送水圧法）・透気性（送気圧法）試験機法」（トヨフク法）が、既往の製品であるダブル

チャンバー透気性（吸気圧法、トレント法）試験測定の同一箇所、構造物下面を含む全方位の透水性が、水圧状態（最大 80kpa, 標準 55kPa）において、20 分程度で測定可能である非破壊検査法であることを試験方法から検証し、これらの試験法を組合わせた試験法によるコンクリートの品質診断法の有効性について研究したものである。

2. ダブルチャンバー透水性（送水圧法）・透気性（送気圧法）試験法（トヨフク法）の概要

透水性（透気性）試験機は図-1 に示すように、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（透気性）は内側チャンバーの透水量（気圧低下時間）によって評価される。

外側チャンバーの圧力（図-1 の②）とシール材によ

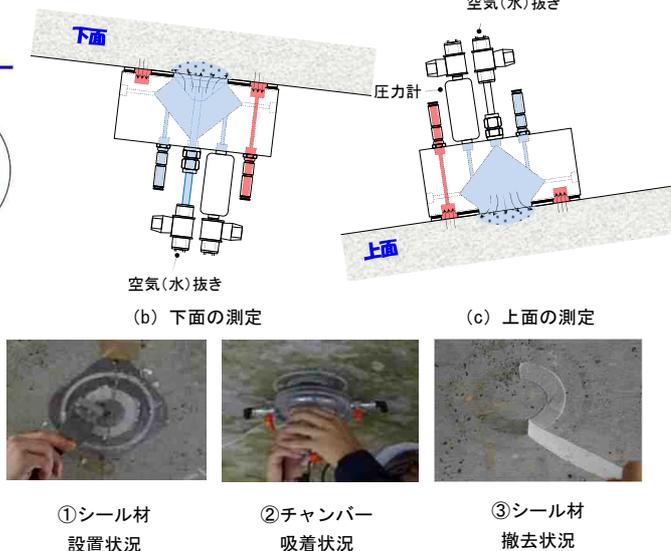
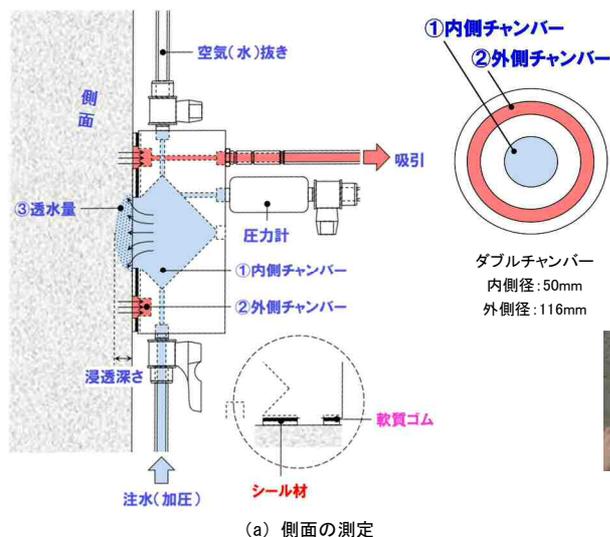


図-1 ダブルチャンバー透水性試験の試験原理

写真-1 漏水無しに測定後、きれいに剥がせるシール材

*1 九州産業大学大学院 工学研究科博士後期課程 (学生会員)
 *2 九州産業大学 工学部都市基盤デザイン工学科 (正会員)
 *3 九州産業大学 工学部都市基盤デザイン工学科 (正会員)
 *4 九州産業大学 工学部都市基盤デザイン工学科

り、内側チャンバーからの水（空気）の流出が排除され（図-1の①）、結果として内側チャンバー下に透水（空気）の流れ（図-1の③）が形成される。この水（空気）の流れから、透水性試験の場合、透水量 w (cm^3) が式(1)より、透水性指数 P (m/sec , 以降 P 値とする) が式(2)より求められる。

$$w = w_1 - w_0 \quad (1)$$

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

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 : 透水水压 (kPa)

また、透気性試験の場合、透気開始時の空気圧 P_1 (kPa) が試験時に P_2 (kPa) へと空気の流れによる気圧低下の時間 t_2 (sec) から、透気性速度指数 K_v (kPa/s , 以降 K_v 値とする) が、式 (3) より求められる。

$$K_v = (P_1 - P_2) / t_2 \quad (3)$$

試験機の構造は、透水性試験の場合に測定面の角度に拘らず内側チャンバー内に空気が残留しないようにするため、内面を傾斜させエア抜き用流路を設けた構造としており、構造物下面の場合、エア抜きパイプを取付けて流路を設けた構造（図-1 (b)）としている。さらに、透水性（透気性）試験を行う場合、測定箇所表面の施工時や表面風化により発生した凹凸などからの漏水（漏気）を防止するため、コンクリート表面に貼り付けたシール材（保水性極軟質粘土、厚さ 0.7mm）に、チャンバー一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-1）。

3. 性能確認試験

3.1 試験概要

性能確認試験として、コンクリートの圧縮強度、中性化、塩化物イオン浸透性、ひび割れ密度推定の可能性を検討した。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（スランプ一定，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プ変化，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（表-1）。試験面は，柱部材側面，床部材上面のそれぞれ2箇所とし，ダブルチャンバー透気性試験機（トレント法）で透気性指数（ K 値， $\times 10^{-16} \text{m}^2$ ，シール材有り）で1点測定，透気時間 K_t (sec ，1点で3回測定し平均）， P 値（1点測定，透水圧力 55kPa，透水時間 20分）の順に非破壊試験を行った後にこれらの箇所からコア（ $\phi 100 \times 200 \text{mm}$ ）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 個を同時に採取して塩化物イオン浸透深さ試験（JSCE-G572-2010，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 0.1mol/l硝酸銀溶液を噴霧し，変色境界までの平均深さ測定）を行った。

また，表-2 に示す 28～63 年の長期供用の既設橋梁（RC 橋：11 橋）の RC 床版においても同様の調査を行い，これらの非破壊試験データ（平均値）とコンクリート品質との関係を回帰分析によって解析し，品質調査の実用性を検証した。

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 普通30W164	61(185/304) 54(164/304)	1年 2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) ・柱部材・床部材から採取した $\phi 10 \times 20 \text{cm}$ のコア	・屋外暴露(空气中, 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15	87(166/192)	2年 3年 4年 5年 6年 7年		
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)

・スランプ: $8 \pm 2.5 \text{cm}$, 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+老岐沖産海砂, 粗骨材: 古賀産砕石, 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, スランプ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(スランプ: $8 \pm 2.5 \text{cm}$)

表-2 既設橋梁の概要

橋梁名	構造形式	橋長 (m)	供用年数 (年)
a	RC床版橋	3.6	28
b	RCボックスカルバート	4.6	53
c	RC床版橋	5.1	53
d	RC床版橋	3.3	53
e	RC床版橋	2.7	53
f	RC床版橋	5.8	53
g	2径間連続RC床版橋	10.9	53
h	RC床版橋	9.7	63
i	RC床版橋	3.7	63
j	RC床版橋	8.69	63
k	2径間連続RC床版橋	10	63

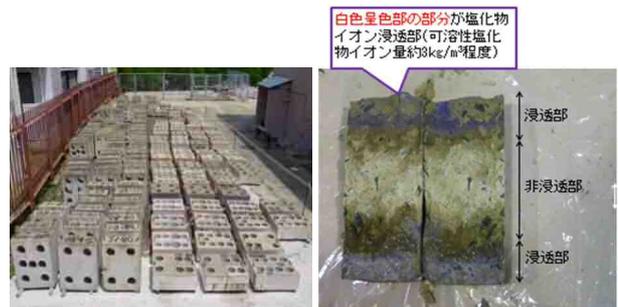


写真-2 暴露供試体の配置状況

写真-3 塩化物イオン浸透深さ試験

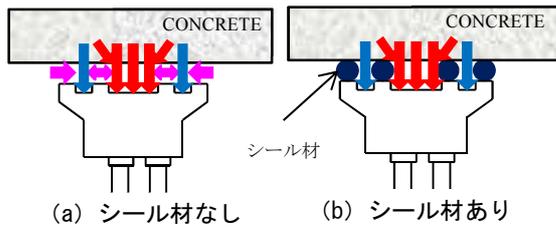


図-2 トレント法におけるコンクリート表面シール材の有無による空気の流れ

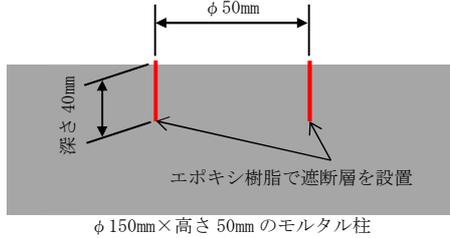


図-3 モルタル供試体中の遮断層による水（空気）の流れ試験

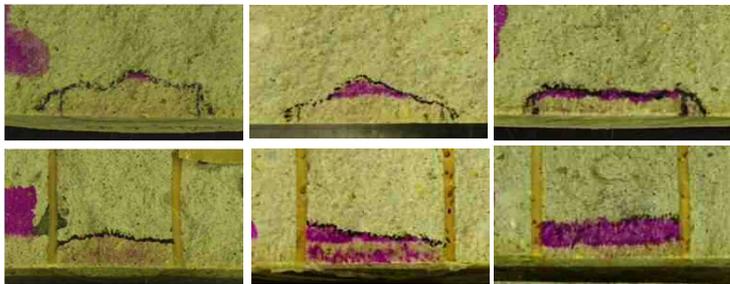


写真-4 φ50mm 周辺遮断層の有無と透水量 (上: 遮断層なし, 下: 遮断層あり)

3.2 試験結果と考察

(1) 水（空気）の流れとの関係性

トレント法（吸気圧法）の場合，空気の流れは，コンクリートの表面での横方向の流れ，吸引部直下およびその周辺からの流れがあると考えられる（図-2）。

一方，トヨフク法のダブルチャンパー透水性（送水圧法）・透気性（送気圧法）試験は，内側チャンパーの内径φ50mm部分のみの測定としている。そこで，水（空気）の流れを確認するため，圧縮強度15，22，30N/mm²の普通コンクリートのモルタル，それぞれ普通15（M15），普通22（M22），普通30（M30）を用いたφ150×高さ50mmの供試体（材齢5年）を使い，チャンパー内径φ50mmの円周を削孔し，エポキシ樹脂にて遮断層を設置し（図-2），透水性（透気性）試験を行った。

その結果，透水性指数P値，透水量w，透気速度指数Kv値，透気性指数K値ともに遮断層がある場合に比べ，遮断層がない場合に高めに測定された（図-4，5，6，7）。また，ダブルチャンパー透水試験直後の供試体の割裂面を観察し，断面が濡れている境界にマーキングを行った（写真-4）結果からも，内径φ50mm部だけでなくその外側へも水（空気）が流出していると判断され，内側

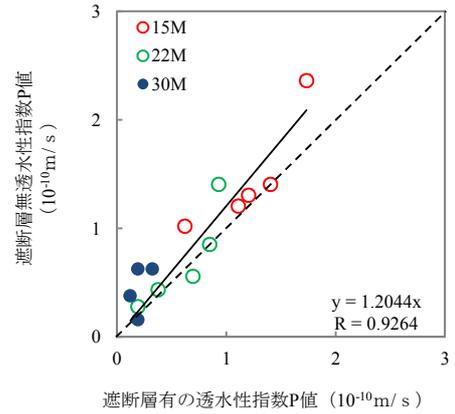


図-4 遮断層有無と透水性指数 P

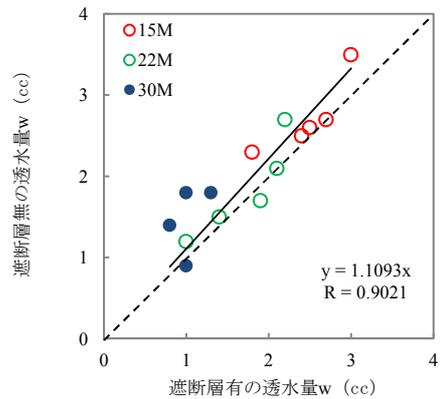


図-5 遮断層の有無と透水量 w

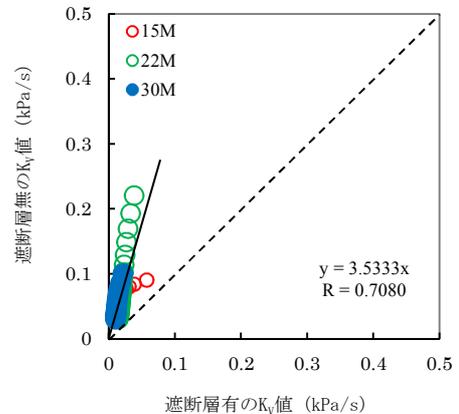


図-6 遮断層の有無と透気速度指数 Kv

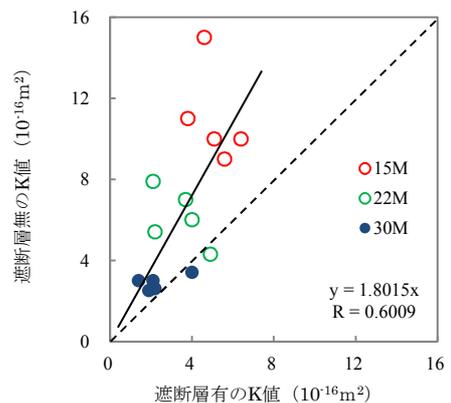


図-7 遮断層の有無と透気性指数 K

チャンバーの内径直下のみならず、この周辺を含んだ表層コンクリートの透水性（透気性）を測定していることが判明した。

また、暴露供試体の漏気対策としてコンクリート表面に貼り付けているシール材（図-2）の有効性についても検討した（図-8）。柱部材や床部材下面は、シール材の有無に関係なく測定値は一定であるが、床部材上面は、シール材なしの場合にくらべ、透気性指数 K が低く測定された。柱部材や床部材下面は鋼製型枠材使用により凹凸が少ないが、床部材上面は、コテ仕上げや風化による凹凸があり、シール材（厚さ 7mm）を設置することで、漏気対策として有効性が確認された。

(2) 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 と透水性指数 P 値との関係を部材別に求めると、 W/C が大きいほど、 P 値が大きくなる（図-9、正の指数式）、水セメント比との相関が見られる ($R=0.722$)。

また、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、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-9に併記したように、本試験において測定された透水性指数 P 値と W/C との関係は、全体的に両者は適合している。

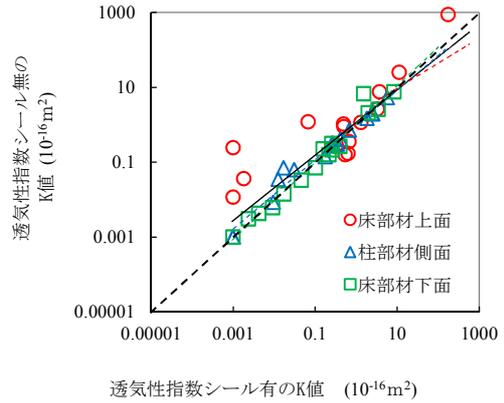


図-8 コンクリート表面シール材の有無と K 値の関係

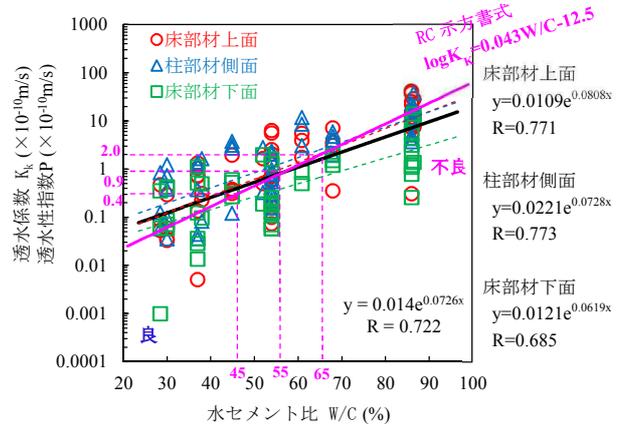
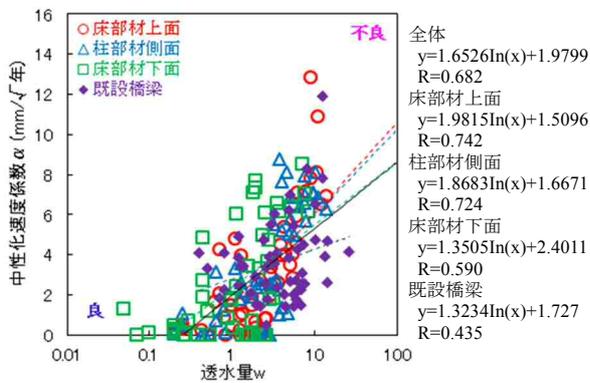
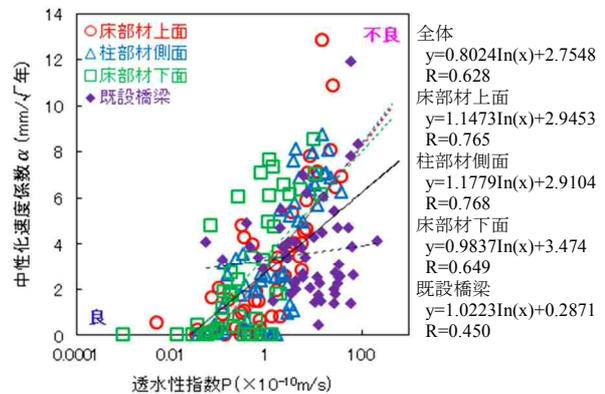


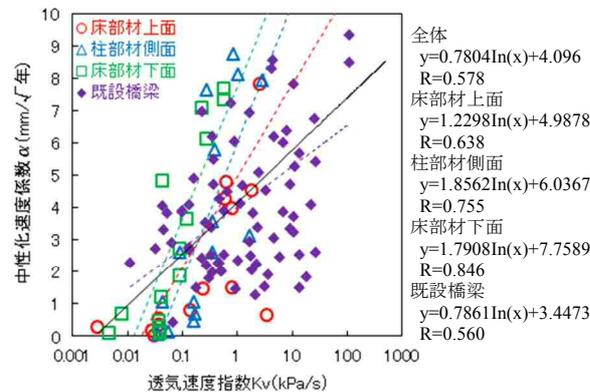
図-9 水セメント比 W/C と透水性指数 P



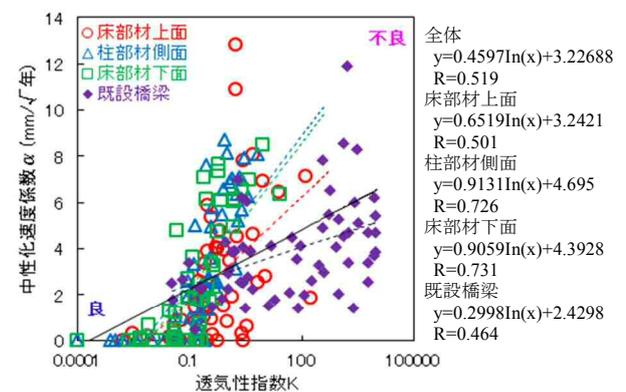
(a) w と α



(b) P と α



(c) K_v と α



(d) K と α

図-10 中性化速度係数 α と非破壊試験値との関係

(3) 試験結果とコンクリート品質との関係

試験結果から、透水量 w 、透水性指数 P 値、透気速度指数 K_v 、透気性指数 K とコンクリート品質（中性化との関係を(4)に、塩化物イオン浸透深さとの関係を(5)に、圧縮強度との関係を(6)に示し、部材別に求めると図-10～図-12に示すとおりである。各図には床部材上面は赤、同下面は緑、柱部材側面は青、既設橋梁は紫、全体は黒表記とし、相関性を検証するため、相関係数 R に加え、良側と不良側を表記する。

性能確認試験より、一定の環境に配置されている暴露供試体による試験（材齢1～7年）の相関性に比べると、供用年数が28～63年と長い既設橋梁による試験については、繰返し雨水・塩水、乾燥等の環境条件が種々異なるため、それらの影響を受け、全体的に相関性が低い傾向となった。

(4) 中性化（中性化速度係数 α ）との関係

非破壊試験値とコアの中性化速度係数 α (mm/ \sqrt{t}) との関係は、図-10に示す通りである。中性化速度係数 α との相関が強い順は、透水量 w (正の対数式, $R=0.682$)、透水性指数 P 値 (正の対数式, $R=0.628$)、透気速度指数 K_v (正の対数式, $R=0.578$)、透気性指数 K 値 (正の対数式, $R=0.519$) の順になっている。この中で、透水量との関係性に着目すると、透水量が増加するにつれ中性化速度係数も高くなる傾向があり、透水性指数 P 値につい

ても同様の結果となっている。また、透気速度指数 K_v や透気性指数については、値が大きくなるにつれ中性化速度にばらつきがみられる。

透水量、透水性指数 P 値との相関が高くなっている理由として、透水量、透水性指数 P 値が環境（気象、含水、透水、雨がかり）条件を最も表す指標であると推察される。また、既設橋梁においては、材齢が進むほど水和生物の増加により緻密になり、空隙率が減少することで、透水量や透水性指数 P 値のばらつきが減少すると推察される。

(5) 塩害（塩化物イオン浸透深さ DC ）との関係

非破壊試験値とコアの塩化物イオン浸透深さ DC (mm) との関係は、図-11に示す通りである。塩化物イオン浸透深さ DC (mm) との相関が強い順は、透水量 w (正の対数式, $R=0.619$)、透水性指数 P 値 (正の対数式, $R=0.685$)、透気速度指数 K_v (正の対数式, $R=0.601$)、透気性指数 K 値 (正の対数式, $R=0.609$) の順になっている。この中で、透水量との関係性に着目すると、透水量が増加するにつれ塩化物イオン浸透深さも高くなる傾向があり、透水性指数 P 値についても同様の結果となっている。また、既設橋梁については、中性化と同様に透気速度指数 K_v や透気性指数については、値が大きくなるにつれ塩化物イオン浸透深さにばらつきがみられる。中性化と同様に、含水（透水、透気）要因である P 値や

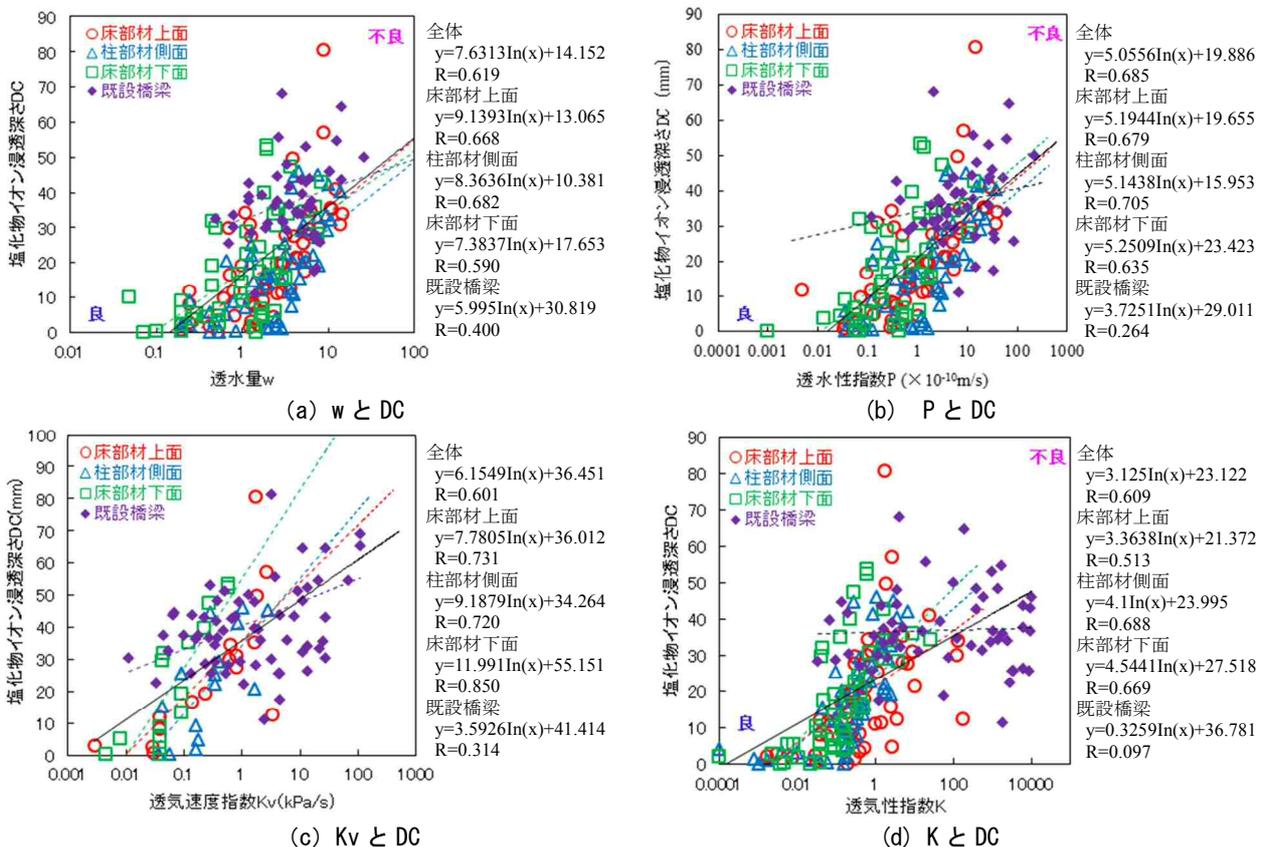


図-11 塩化物イオン浸透深さ DC と非破壊試験値との関係

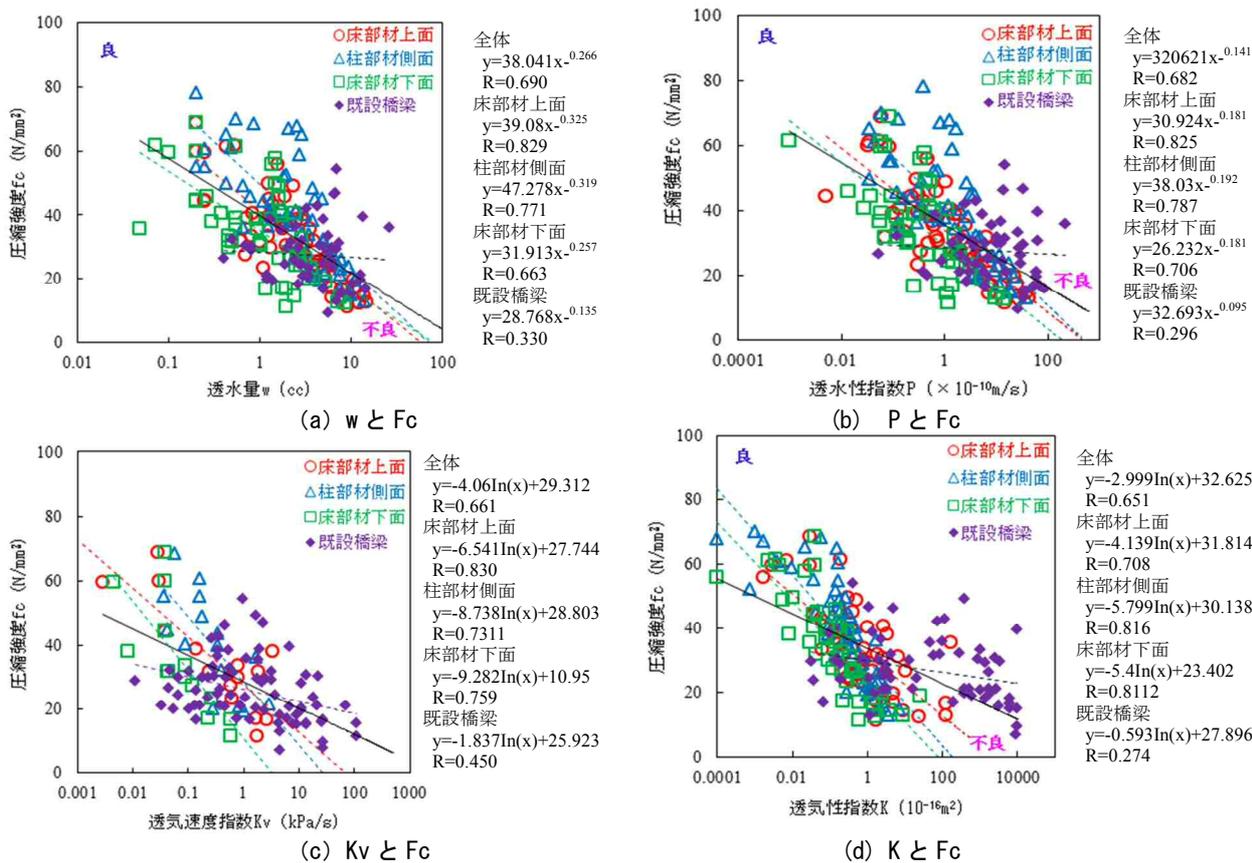


図-12 圧縮強度 f_c と非破壊試験値との関係

透水量は塩化物イオン浸透深さとの相関も強く、影響が大となっている。

また、中性化と同様に既設橋梁については、環境条件の影響から透水量、透水性指数ともに高い傾向となった。

(6) コア圧縮強度 f_c との関係

非破壊試験値とコア圧縮強度 f_c (N/mm²) との関係は、図-12 に示す通りである。コア圧縮強度との相関が強い順は、透水量 w (負の累乗式, $R=0.661$)、透水性指数 P 値 (負の累乗式, $R=0.682$)、透気速度指数 K_v (負の対数式, $R=0.609$) の順になっており、コア圧縮強度は空気量 (空隙の多さ) と負の相関が強いため、透水量や P 値との相関が強く、中性化と同様に影響が大となっている。

また、中性化、塩化物イオン浸透深さと同様に既設橋梁については、環境条件の影響から透水量、透水性指数ともに高い傾向となった。

4.まとめ

非破壊試験の結果、透水量と透水性指数 P 値が高くなるにつれて、中性化速度、塩化物イオン浸透深さ、圧縮強度も高くなる傾向がある。また、ダブルチャンバーの内側チャンバーの直下のみならず、この周辺を含んだ表層コンクリートの透水性 (透気性) を測定していることが判明した。

このことから、表層コンクリートの品質診断法 (中性

化深さ、塩化物イオン浸透深さ、圧縮強度など) として開発したダブルチャンバー透気性試験法 (シール材有りの吸気圧法) に加え、ダブルチャンバー透水性・透気性試験法 (送水圧法・送気圧法) による方法は、表層コンクリートの耐久性 (中性化速度など) との強い相関性が認められ、実用性が検証された。

参考文献

- 1) 豊福俊泰, 高橋典子, 永松武則, 細川土佐男: 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, コンクリート工学年次論文集 2015, Vol.37, No.1, pp.1801-1806, 2015.6
- 2) 豊福俊泰, 春日井俊博, 松尾栄治, 永松武則, 高橋典子: ダブルチャンバー透水性試験・透気性試験による表層コンクリートの非破壊検査法の開発, 日本非破壊検査協会, コンクリート構造物の非破壊検査シンポジウム論文集, Vol.5, pp. 277-282, 2015.8
- 3) 豊福俊泰, 春日井俊博, 松尾栄治, 永松武則, 高橋典子: ダブルチャンバー透水性試験・透気性試験による RC 床版の表層品質評価事例, 日本非破壊検査協会, コンクリート構造物の非破壊検査シンポジウム論文集 (Vol.5), pp. 283-288, 2015.8
- 4) 豊福俊泰, 春日井俊博, 細川土佐男, 永松武則, 高橋典子, 松尾栄治: ダブルチャンバー透水性・透気性試験機法の試験方法に関する研究, 日本非破壊検査協会, 平成 27 年度秋季講演大会講演概要集, pp. 205-208, 2015.10