

## 論文 既設コンクリート構造物における塩分拡散係数と透気係数の関係

山本 雅行\*1・下瀬 千江里\*2・半井 健一郎\*3

**要旨**：既設コンクリート構造物の塩害に対する抵抗性の評価は、通常、塩化物イオンの見かけの拡散係数を用いるが、そのためには塩化物イオン濃度の実測値が必要であり、試料採取のためコア削孔などの破壊を伴う。本論では、既設構造物の破壊試験から得られる塩化物イオンの見かけの拡散係数と、その近傍箇所で行った非破壊試験である表層透気試験（トレント法）から得られる表層透気係数の関係性を分析した。その結果、両者の間に一定の相関性が確認できた一方で、並行して実施した室内試験から得られる関係とは大きく離したものであることが明らかになった。

**キーワード**：塩害、塩化物イオンの見かけの拡散係数、表層透気試験、非破壊試験

## 1. はじめに

近年、既設コンクリート構造物の塩害が大きな問題となっている。特に飛来塩分や凍結防止剤の影響を受けやすい沿岸部や寒冷地の構造物においては、多くの塩化物イオンがコンクリート内部に浸透する可能性がある。鋼材位置の塩化物イオン濃度が一定値以上になると、鋼材の腐食が開始され、進行とともに腐食部の体積が元の数倍に膨れ上がるため鋼材とコンクリートの付着低下、かぶりの剥離、ひいてはコンクリート構造物の耐力の低下を招くことになる。

塩害環境下に存在する既設コンクリート構造物の健全度評価にあたっては、一般に、打音によるかぶりコンクリートの浮き範囲の確認、はつり調査による鉄筋の腐食度の確認、コアやドリル採取による塩化物イオン濃度の測定などが行われている。これらは大なり小なり破壊を伴うことや、広範囲かつ詳細に行うとコストも膨大なものになることから、代替となる非破壊検査手法が望まれており、活発に研究、開発がされている。

塩化物イオン濃度の測定は、その実測データを用いて現在の鋼材位置の塩化物イオン濃度確認やその将来予測をするために行うものである。将来予測には塩化物イオンの拡散係数や表面塩化物イオン濃度などを用いる。特にコンクリートの塩化物イオンの拡散係数は、構造物の塩害に対する抵抗性の照査における重要な指標値である。土木学会コンクリート標準示方書では、既設構造物等で測定されたデータに基づく拡散係数の関係式より、見かけ塩化物イオンの拡散係数（以下  $Dc$ ）を推定する。一方でコンクリート表層の品質を評価する指標として表層透気係数（以下  $kT$ ）がある。 $kT$  は非破壊による測定が可能であり、室内試験においては塩化物イオンの拡散係数と良好な関係が示されている<sup>1)2)</sup>ものの、既設構造物にお

ける  $Dc$  と  $kT$  との関係の分析は多くない。

そこで本論では、既設コンクリート構造物の調査から  $Dc$  と  $kT$  との相関を分析することにより、表層透気試験の実測値から塩分浸透抵抗性を評価できる可能性を検討する。また、実構造物調査と室内試験の結果をもとに環境の違いが塩化物イオンの浸透性や表層透気試験の結果に及ぼす影響を分析することで、それぞれの結果の妥当性を検討する。

## 2. 供試体による室内試験

## 2.1 室内試験の概要

室内試験は、水セメント比  $W/C$  を変化させた直径 100mm、高さ 200mm の円柱供試体を作製し、表層透気試験と塩分浸透試験の実施により、既往の研究で報告されている  $kT$  と  $Dc$  の関係を確認するとともに、後述する既設構造物の調査結果と比較検証するために実施した。作製した供試体の概要は以下である。

## (1)材料と配合

使用材料を表 - 1 に、コンクリート配合を表 - 2 に示す。セメントは普通ポルトランドセメント（OPC）を用い、 $W/C$  は 0.45, 0.5, 0.55, 0.6 の 4 水準とした。単位水量を一定とし、セメント量と骨材量を変化させた。

## (2)養生

温湿度の制御のない屋内（平均温度：34.4℃）で 5 日間の封緘養生後、23 日間の水中養生を行った。養生終了後は、同じ屋内（平均温度：25.9℃、平均湿度：62%R.H.）で 3 ヶ月間の気中暴露を行った（塩分浸漬用を除く）。

## (3)供試体数

供試体は塩分浸漬用に 3 体、供試体制作時から含まれる初期塩分の確認用に 1 体、表層透気試験用に 4 体の計 8 体ずつ作製した。

\*1 西日本高速道路エンジニアリング中国（株）道路技術部 道路技術第一課（正会員）

\*2 広島大学工学部第四類（建設・環境系）社会基盤環境工学課程

\*3 広島大学大学院工学研究科 社会基盤環境工学専攻 教授 博士（工学）（正会員）

表 - 1 使用材料

材料	記号	種類・物性
水	W	水道水
セメント	C(OPC)	普通ポルトランドセメント・密度：3.16(g/cm <sup>3</sup> )
細骨材	S	黒瀬町産砕砂・表乾密度：2.58(g/cm <sup>3</sup> )、吸水率：1.25(g/cm <sup>3</sup> )
粗骨材	G	黒瀬町産砕石・表乾密度：2.61(g/cm <sup>3</sup> )、吸水率：0.56(g/cm <sup>3</sup> )

表 - 2 コンクリートの配合

配合名	W/C	実測値			s/a	単位置				混和剤量	
		Sl.	空気量			W	C(OPC)	S	G	SV10L	AE-6
		cm	%	%		kg/m <sup>3</sup>				kg/m <sup>3</sup>	
OPC45	0.45	9.5	5.8	43.2	170	378	758	1013	2.27	0.76	
OPC50	0.50	9.0	5.5	44.2	170	340	790	1012	2.04	0.68	
OPC55	0.55	9.5	4.8	45.2	170	309	819	1008	1.85	0.62	
OPC60	0.60	9.0	5.3	46.2	170	283	847	1001	1.56	0.85	

※Sl.: スランプ値

塩分浸漬用の供試体 (3 体) は、JSCE-G572-2003 (浸せきによるコンクリート中の塩化物イオンの見掛けの拡散係数試験方法 (案)) に従って塩分浸漬を実施した。両端面から約 25mm 部分を切断除去して、..高さ 150mm 程度にし、打込み側の切断面のみを残してそれ以外の面をエポキシ樹脂塗料で完全に被覆した。エポキシ樹脂の硬化後、温度 20±2℃ の水中で 24 時間以上保存した。その後、温度 20±2℃、濃度 10% の塩化ナトリウム水溶液中に、被覆していない開放面が常時溶液に接するように浸漬させた。浸漬期間は、3 カ月とした。浸漬試験状況を写真 - 1 に示す。



写真 - 1 塩分浸漬試験状況

供試体作製時から含まれる初期塩分の確認用の供試体 1 体については、高さ方向中央部から厚さ 1cm の円盤試験片を切り出したものを、浸漬完了した供試体は、表面から 1cm ごとに供試体をスライスし、JIS A 1154:2011 (硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオンの試験方法) による全塩化物イオン量を測定した。測定後、コンクリートの見かけの拡散係数  $D_c$  は、試験から得られた塩化物イオン濃度を用いて Fick の拡散第 2 則を解いた方程式(1)より回帰分析し、算出した。ただし、ここでは安全係数  $\gamma_{cl}$  は考慮しない。

$$C(x, t) - C_i = \gamma_{cl} C_0 \left( 1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{D_c \cdot t}} \right) \quad (1)$$

ここで、 $C(x, t)$  : 表面からの深さ  $x$ (cm) および浸透期間  $t$ (年) における塩化物イオン濃度(kg/m<sup>3</sup>)、 $C_i$  : 初期塩分濃度(kg/m<sup>3</sup>)、 $C_0$  : 表面塩化物濃度(kg/m<sup>3</sup>)、 $\operatorname{erf}$  : 誤差関数、 $\gamma_{cl}$  : 鋼材位置における塩化物イオンの設計値のばらつきを考慮した安全係数、 $x$  : 表面からの深さ(cm)、 $D_c$  : 見かけの拡散係数(cm<sup>2</sup>/年) である。

図 - 1 に測定値および回帰分析結果を例示するとともに、全データの  $D_c$  および  $C_0$  の平均値を示す。

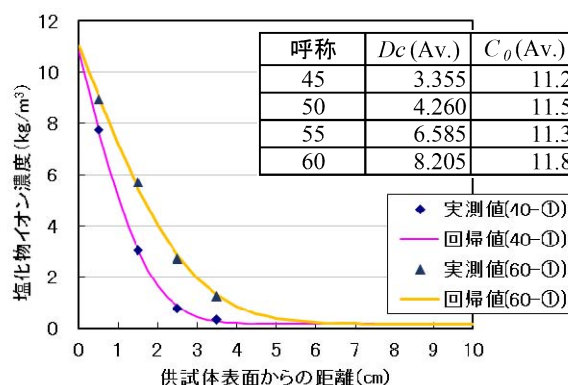


図 - 1 室内試験の塩化物イオンの回帰分析例

表層透気係数測定にはトレント法<sup>1)2)</sup>を用いた。表層透気係数測定とは、コンクリート表層部の透気性を非破壊試験により測定し、かぶりコンクリートの品質を評価する試験である。透気性は、内側と外側にチャンバーを有する測定部内を負圧にすることで発生する内側チャンバーの圧力の変化によって測定される。この圧力変化量とその時間経過から、式(2)によって  $kT$  が算出される。

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

ここで、 $kT$  : 表層透気係数(m<sup>2</sup>)、 $V_c$  : 内側チャンバーと接続要素の容積(m<sup>3</sup>)、 $\varepsilon$  : コンクリートの空隙量(m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>)、 $A$  : 仮定された栓流の断面積(m<sup>2</sup>)、 $P_i$  : 内側チャンバーの圧力(N/m<sup>2</sup>)、 $P_a$  : 大気圧(N/m<sup>2</sup>)である。

表層透気係数の測定は、表層透気試験用の試験材齢 3 カ月の供試体の端面 (モールドの底面側) にチャンバーを取付けて行った。測定結果は 4 本の平均値として整理した。写真 - 2 に測定状況を示す。なお、予備検討において側面のシールの有無による影響を比較したところ、両者の測定結果には有意な差が認められなかったことから、側面をシールせずに測定を行うこととした。



写真 - 2 供試体の表層透気試験状況

## 2.2 室内試験の結果

室内試験の結果を図 - 2 に示す。図より  $D_c$  と  $kT$  に明確な相関が得られ、各供試体の W/C から事前に予想された品質の程度と合致する結果となった。

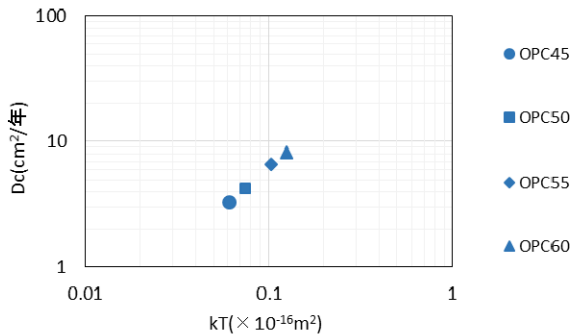


図 - 2 室内試験における  $kT$  と  $D_c$  の関係

## 3. 既設構造物の調査

### 3.1 調査対象構造物の概要

調査対象とする既設コンクリート構造物は、表 - 3 に示す 3 橋梁 (5 構造物) を選定した。いずれも中国地方の高速道路で、冬期には凍結防止剤を散布している橋梁である。構造物種類を統一するため、RC 中空床版橋の上部工とし、供用年数も同程度とした。測定箇所はアクセスの容易さ等も考慮して桁端部の周辺を対象とした。

表 - 3 測定既設構造物概要 (橋梁上部工)

No.	略称	上下	調査箇所	供用年	箇所数
1	M 橋	上り	RC 中空床版/桁端部	31 年	4 ヶ所
2		下り			4 ヶ所
3	O 橋	上り	RC 中空床版/桁端部	28 年	1 ヶ所
4	S 橋	上り	RC 中空床版/桁端部	28 年	2 ヶ所
5		下り			5 ヶ所

### 3.2 塩化物イオン濃度の測定と拡散係数 $D_c$ の算出

調査対象構造物の塩化物イオン濃度測定は、およそ 1 年前の定期点検時に実施された結果を用いた。試料は、

径 14mm のビットを用いたハンマードリルを使用し、コンクリート表面から深さ方向 2cm ごと 5 深度のドリル粉末とした。試験に必要な量の確保 (10g~20g) と粗骨材による測定値のばらつきの影響を低減するため、一箇所当たり 3 本分を採取した。採取状況を写真 - 3 に示す。



(a)ドリル試料採取 (b)試料採取済み孔

写真 - 3 コンクリート試料採取状況

塩化物イオン濃度の試験方法は、エネルギー分散型蛍光エックス線分析装置により実施した。本試験方法は、対象とする試料に X 線を照射して、それにともない発生する元素固有の波長を持つ蛍光 X 線を分析する方法である。固有の波長から元素 (塩素) を特定でき、その大きさ (強度) から量の推定が可能である。公定法とされる JIS A 1154 (電位差滴定法) と比較して試験手順が簡易かつ迅速に結果が得られるなどの利点がある。試料は、ドリル粉末を 150 $\mu$  以下の粒度に調整後、専用ホルダーに 5g~10g の量を入れ、底面の専用フィルム面に隙間がないようにタッピングしたものを 1 試料当たり 2 サンプル作成した。試験は、1 サンプル当たり 2 分間の測定 (X 線照射) とし、2 サンプルの平均値を測定結果とした。塩化物イオン濃度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) への換算は、基準とする JIS A 1154 とほぼ同等の結果が得られることが確認された換算線を用いた。写真 - 4 に試験状況を示す。



(a)試料分取 (b)試料セット

写真 - 4 塩化物イオン濃度試験状況

$D_c$  は、試験から得られた塩化物イオン濃度を用いて 2.1 の項で記述した方程式(1)により算出した。実測値により求める場合は、深さ方向 3~5 箇所のデータにより回帰することを標準とした。なお、 $D_c$  算出においてコンクリート表面付近の中性化の影響を受けて塩化物イオン濃度が低下したと判断された場合は、その 1 点目のプロ

ットは棄却して2点目以降のプロットでフィッティングを行った。また、フィッティングが可能であっても各深度の塩化物イオン濃度が  $1.0 \text{ kg/m}^3$  程度以下でかつ塩化物が外部から浸透拡散したのではなく元々の内在塩分であると判断できる箇所の  $D_c$  算出は、本来の定義とは異なるため測定対象箇所からも除外した。図 - 3 に測定値および回帰分析結果を例示するとともに、全データの  $D_c$  および  $C_0$  の平均値を示す。

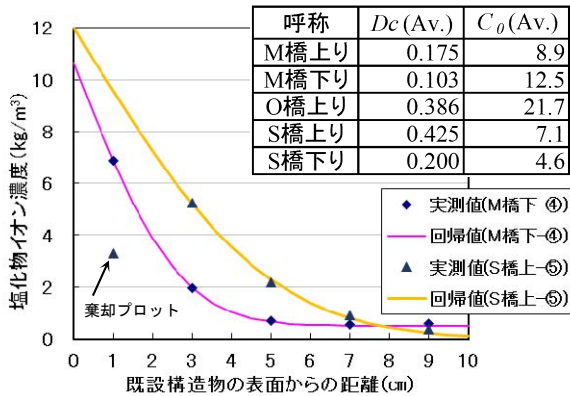


図 - 3 既設構造物の塩化物イオンの回帰分析例

### 3.3 表層透気係数測定

表層透気係数の測定には、前述の室内試験と同様にトレント法<sup>1)2)</sup>を用いた。測定は、対象構造物の  $D_c$  を算出したドリル削孔部付近の6点を測定し、その平均を調査対象箇所の  $kT$  とした。測定点はひび割れを極力避けたが、目視で容易に判別できない微細なひび割れが原因で  $kT$  が異常値を示す場合は参考値とし、参考値以外の記録が6点になるまで測定を行った。写真 - 5 に測定状況を示す。



写真 - 5 表層透気係数測定状況 (O橋)

### 3.4 含水率測定

表層透気係数の測定においては、測定時のコンクリートの含水状態が大きく影響する。そこで、表層透気係数測定時には市販の含水率計 CMEX II を用いて、コンクリートの含水率を測定した。含水率計の原理は、低周波信

号を送信し、材料の水分率によって変化するインピーダンスを測定することで含水率が求められる。ドリル削孔部付近2点を測定し、平均を調査対象箇所の含水率として記録した。写真 - 6 に測定状況を示す。



写真 - 6 含水率測定状況

### 3.5 既設構造物の調査結果

既設構造物調査で得られた  $kT$  と  $D_c$  の関係を図 - 4 に示す。図から、ばらつきがあり両者の相関はあまりみられない結果となった。

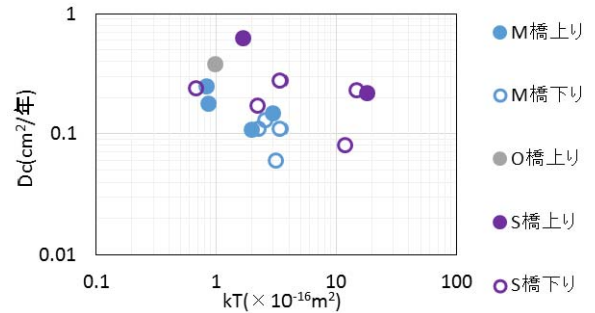


図 - 4 既設構造物の  $kT$  と  $D_c$  の関係 (全データ)

これらデータのばらつきの要因を以下に考察する。

#### (1) 測定箇所の不一致

$kT$  測定箇所は、 $D_c$  を求めたドリル削孔箇所の付近ではあったものの比較的広範囲にあり、一致する箇所ではなかったことがばらつきの要因となった可能性がある。その影響を検討するために、構造物毎に試験結果の平均

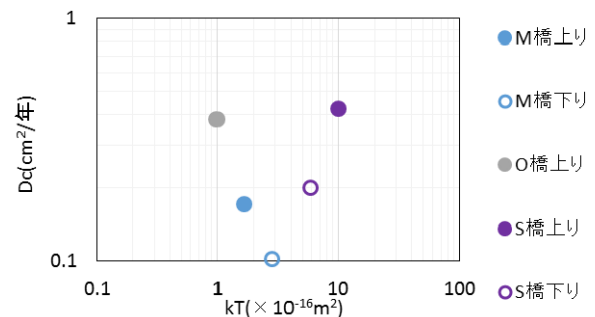


図 - 5 既設構造物の  $kT$  と  $D_c$  (構造物ごとの平均)

値を算出した。図-5に $kT$ と $Dc$ の構造物ごとに求めた平均値の関係を示す。図よりO橋上り以外は、右上がりの正の相関を確認することができた。O橋上りは、測定データが一点のみしかなく、後述する測定時の環境条件が影響した可能性がある。このことから構造物や打設コンクリートの同ロット、同様な環境条件ごとなどの括りで区分した評価が必要であることが示唆された。

## (2) 測定時の乾燥状態の違い

測定時の乾燥状態の違いがばらつきの要因となった可能性がある。その影響を検討するために、含水率の測定結果を用いて検討を行った。図-6に $kT$ と測定した含水率の関係を示す。

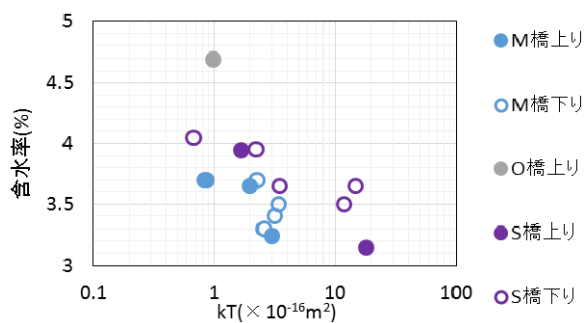


図-6 既設構造物の $kT$ と測定した含水率(全データ)

ばらつきはあるが、含水率の増加にともない $kT$ は低下している傾向が確認できる。また、ばらつきはO橋上りが顕著であるように見られる。O橋上りの測定日は、天候は晴れで気温も高くコンクリート表面は乾燥していた。しかし湿度が、72~74%であり、その他の既設構造物の測定時湿度の50~54%と比較して明らかに高い傾向にあった。このことから、O橋は、測定時の湿度の影響を受けて含水率が高く、 $kT$ を評価する上で測定時における表面含水率の影響が無視できなかった可能性が考えられる。ここで、その水分がもともとのコンクリートが持つものか、或いは雨水や結露などで一時的に外部からもたらされたものかを明確に判断する必要があると考える。ただし、O橋上りのデータはこの1点のみで、特異値であった可能性もあり、測定時のコンクリート表面の含水状態が $kT$ と $Dc$ のばらつきにおよぼす影響は明確にできなかった。

## 4. 室内試験結果と既設構造物調査との比較

室内試験結果と既設構造物調査の結果(但し、O橋上りを除く)を図-7に示す。両試験結果ともに、同程度の傾きの増加傾向を示し、 $kT$ と $Dc$ の良好な相関が確認された。しかし室内試験結果と既設構造物調査結果に大きな乖離が見られる。

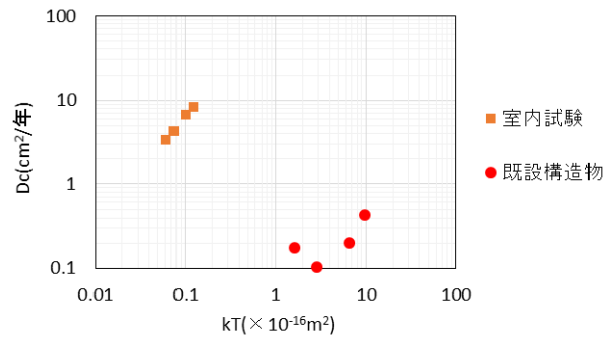


図-7 室内および既設構造物の $kT$ と $Dc$ の関係

既設構造物調査結果は、室内試験に比べ $kT$ が大きく(低品質)、 $Dc$ が小さい(塩分遮蔽性が高い)傾向が見られた。原因を以下に考察する。

### (1) コンクリート構造物の劣化の影響

現場では、コンクリートの浮きや剥離、錆汁などの劣化部分は避けて測定を行ったものの、 $kT$ が他データと比べて1オーダー以上大きくなっている場合に、測定箇所を詳細に確認し、微細なひび割れを確認した上で異常値と判断した。図-8に微細ひび割れの影響を受けた可能性のあるデータを含めた全データと、微細ひび割れの影響と思われる異常値を除いた棄却データで分けて、構造物毎の平均による $kT$ と $Dc$ の関係を示す。その結果、微細ひび割れの影響がない棄却データの $kT$ が全データに比べ低い傾向となった。従って、微細ひび割れなどのコンクリート表面の劣化は $kT$ に大きく影響するため測定時における表面状態の確認は重要な留意事項であるといえるが、図-7に示した室内試験と実構造物調査の乖離を説明するものではなかった。

### (2) 乾燥の影響

既設構造物の供用年は30年程度に対して、室内試験のそれは3カ月程度であり、材齢28日までの水中養生からの乾燥期間は2カ月であった。これまでに、材齢が経過するにつれ水分逸散量および $kT$ は増加することが多くの研究者から報告されている<sup>3)4)5)6)</sup>。図-7の結果においては、室内試験用供試体の乾燥が進行すれば $kT$ は大きく増加し、乖離を埋めるものと考えられる。既存研究からは、少なくとも1オーダー以上は $kT$ の値が増加すると考えられるが、既設構造物調査の延長線上に移動するには、他の要因が存在する可能性がある。

### (3) 塩分供給条件の違いの影響

室内試験では、高濃度のNaCl溶液中に供試体を常時浸漬した。一方で、今回の既設構造物の場合、塩化物イオンが供給される主要因は、凍結防止剤散布であるので、塩分は常に供給される訳ではなく、冬季に集中し頻度は限られている。つまり既設構造物と室内試験では式(1)の浸透期間 $t$ における塩分供給期間が大きく異なる。その

ために既設構造物から得られた  $D_c$  が小さくなった可能性が考えられる。

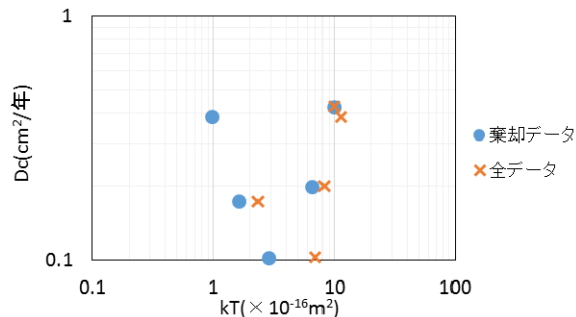


図 - 8 既設構造物の  $kT$  と  $D_c$  (全データと異常値棄却)

## 5. おわりに

本研究により得られた知見を以下に述べる。

- (1)既設構造物調査, 室内試験における  $kT$  と  $D_c$  は右上がりの相関があり, 両者の傾きは概ね同程度である。
  - (2)既設構造物調査結果は, 塩分供給の条件が, 低濃度かつ一定の量が常に供給されておらず, 室内試験の一定の濃度の塩分が常に供給される環境下と大きく異なるため,  $D_c$  の値が室内試験に比べ小さくなる。
  - (3)既設構造物調査結果は室内試験結果に比べ, 試験材齢が高く, 乾燥や, 微細ひび割れを受け  $kT$  が大きくなる傾向がある。
  - (4)既設構造物調査結果から  $kT$  と  $D_c$  の良好な相関が確認できたこと, 室内試験結果との差の要因が明確にできることから, 表層透気試験により既設構造物の  $D_c$  を推定可能である。
- 得られた知見を踏まえ, 考えられる課題と今後の展望を以下に述べる。
- (1)既設構造物調査の測定数が十分であるとは言えない。推定式の検証と精度向上のため対象構造物やその測定箇所数のデータを増やし更に検討する必要がある。

(2)対象構造物が RC 中空床版橋の上部工のみのデータであるため, 異なる形式 (RC 鈎桁橋, PC 桁橋など) のデータを得ることで, 適用範囲を広げることが望ましい。また下部工に対しても同様である。

(3) $kT$  による  $D_c$  推定は, 構造物毎平均による総合評価に有効である可能性があるが, ピンポイントでの推定・評価に関しても今後検討したい。

## 参考文献

- 1) Torrent, R.J.: A two-chamber vacuum cell for measuring the coefficient of permeability to air of the concrete cover on site, *Materials and Structures*, p. 358-365, 25(6), 1992.
- 2) 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案～, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.49, No.3, pp.3-6, 2011.
- 3) 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, 2011.
- 4) 早川健司, 水上翔太, 加藤佳孝: 表面透気試験による構造物かぶりコンクリートの品質評価に関する基礎的研究, *土木学会論文集 E2*, Vol.68, No.4, pp.385-398, 2012.
- 5) Torrent, R., Moro, F. and Jornet, A.: Coping with the Effect of Moisture on Air-Permeability measurements, *Intern., Workshop on Performance-based Specification and Control of Concrete Durability*, pp.489-498, 2014.
- 6) 横山勇気, 酒井雄也, 半井健一郎, 岸利治: 異なる配合と養生を与えたコンクリートの表層透気係数の経年変化, *セメント・コンクリート論文集*, Vol.71, pp. 410-417, 2017.