

## 【委員会報告】

# 土木学会規準「電気泳動によるコンクリート中の塩化物イオンの実効拡散係数試験方法（案）(JSCE-G 571-2003)」の制定

JSCE STANDARDS "TEST METHOD FOR EFFECTIVE DIFFUSION COEFFICIENT OF CHLORIDE ION IN CONCRETE BY MIGRATION"

コンクリート委員会・規準関連小委員会

*Sub-Committee on Test Methods and Specifications for Concrete, Committee on Concrete*

## 1. まえがき

本規準（案）で規定する電気泳動法は、電場に電圧を印加することによってイオンの移動が加速されることを利用して、短期間でコンクリート中の塩化物イオン拡散係数を測定する試験方法である。本方法は、鋼纖維など導電性の材料を含むコンクリート以外の一般的のコンクリートに適用可能である。特に、塩化物イオン浸透に対する抵抗性が大きく、JSCE-G 572-2003 に規定される浸せき方法による試験で塩化物イオンの見掛けの拡散係数を求めようとすると浸せき期間が著しく大きくなるようなコンクリートに対して、有効である。また、これによって、今後開発される高耐久性能の新材料に対しても、短期間に拡散係数を求めることができ、その性能評価がやりやすくなることも期待できる。しかし、本試験で求められる拡散係数は、実効拡散係数と呼ばれるもので、厳密には土木学会コンクリート標準示方書（以下、示方書と称す）で規定され、コンクリート構造物の耐久性照査に用いる見掛けの拡散係数とは異なる。このため、本規準（案）には附属書を添付し、実効拡散係数を見掛けの拡散係数へ変換する方法についても示している。

以下では、この電気泳動法による拡散係数試験方法とともに、実効拡散係数から見掛けの拡散係数への換算方法についても、その概要を示す。

## 2. 試験法の解説

### （1）実効拡散係数 ( $D_e$ ) の測定原理

本試験方法では、コンクリートの細孔溶液中を電場と仮定し、外部電圧を印加することによって、負電荷を有する塩化物イオンを電気的に陽極へ連続的に移動させる。そして、陽極側に移動した塩化物イオン量の測定結果から、陽極側への塩化物イオンの移動が定常状態に達したとみなされた時の塩化物イオンの移動流

束（単位時間・単位面積あたりのイオン移動量）を用いて、拡散係数を算出するものである。この際、定常状態では塩化物イオンの電気泳動に影響を及ぼす固定化などの要因は除外できるものと仮定している。定常状態の判断は、陽極側の塩化物イオン濃度の増加割合が、時間に対して一定になったときとした。また、実効拡散係数 ( $D_e$ ) の計算に必要となる定常状態のイオンの移動流束は、本規準（案）に示した式から、簡便に計算することができる。

### （2）類似の試験方法との関連

電気的手法を用いる類似の試験方法として、ASTM C 1202-94<sup>1)</sup> や NT BUILD 355-97<sup>2)</sup> がある。特に、ASTM C 1202 は、北米を中心に広く普及しているが、電流値と通電時間の積である電気量を指標として、定性的にコンクリート中への塩化物イオンの浸透し易さを評価する方法として規定されており、拡散係数を測定するためのものではない。ただし、本試験方法では、陰極側および陽極側の各溶液の種類とその濃度、コンクリートを水で飽和させる方法などについては、ASTM C 1202 に記載されている方法を参考に規定した。また、本試験方法では、供試体の形状・寸法として直径が 100 mm で厚さが 50 mm の円盤型供試体を規定しているが、これらは ASTM および NT BUILD の試験とも同じである。

### （3）拡散と電気泳動との相違点

本試験方法は、塩化物イオンの浸透を促進する手法として電気泳動現象による方法に着目し、測定した泳動速度から実効拡散係数を推定する方法を規定したものであるが、使用に際しては、電気泳動現象と拡散現象との相違を十分に理解し、両者の関係にどこまでの理論的な裏付けがなされているかを認識しておくことが肝要である。なお、この理論的な侧面からの考察は、解説書<sup>3)</sup>において詳述しているので参考とするとよい。拡散と電気泳動の場合とでは、次のような点に

相違が生じる。

- a) 細孔壁面における電荷の影響
- b) 塩化物イオン以外のイオンの移動による影響
- c) 電気的に高められたイオンの移動速度の影響

コンクリートの細孔中には多種類のイオンが存在し、それぞれが特異な電気化学的性質を有している。したがって、拡散現象と電気泳動現象とでは、塩化物イオンが移動していく時の雰囲気が異なると予想されるにも係わらず、それぞれの現象に対するa)～c)の影響の相違について理論的な説明は十分になされていない。その一方で、実際には浸せき法のような拡散現象を直接評価する試験で得られた拡散係数と電気泳動による試験から推定した拡散係数が、比較的類似した値となるという結果も多く報告されており、実は、上記のような影響は比較的小さいのではないかという見方もある。

#### (4) 試験条件の設定根拠

通電方法として定電圧法を採用した理由は、この方法によって行われた実験データが多いことのほか、拡散係数を算定する際に使用する電位勾配の設定が容易であることによる。また、その際の電圧を15Vに設定した理由は、あまり大きな電圧に設定すると、溶液の温度上昇が生じて測定結果への影響が出てくることや、この電圧では既に多くのデータが蓄積されているため、陽極側での有毒な塩素ガス発生を防止するための溶液交換の条件なども明確となっていることなどによる。本規準(案)では、この実績から溶液中の塩化物イオン濃度が0.05mol/Lを上回ることのないことを管理基準としており、試験期間を通じて、適宜溶液を全量交換することを規定している。

#### (5) 実効拡散係数( $D_e$ )から見掛けの拡散係数( $D_{ae}$ )への変換

フィックの第二法則を利用して塩化物イオンの浸透を予測するには、見掛けの拡散係数が必要となる。そこで、本規準(案)には附属書として、実効拡散係数から見掛けの拡散係数への換算方法を示してある。すなわち、そこでは、現状における実際的な方法として、普通セメント、低熱セメント、高炉セメントB種、およびフライアッシュで内割り置換した普通ポルトランドセメントに対して、既往の実験データをベースとして作成した換算図を用いて換算する方法を提案している。

このようにして本規準(案)より求められる見掛けの拡散係数の信頼性の程度を判断するために、得られた見掛けの拡散係数を、示方書[施工編]に示されている見掛けの拡散係数の予測式を得たための基となつた

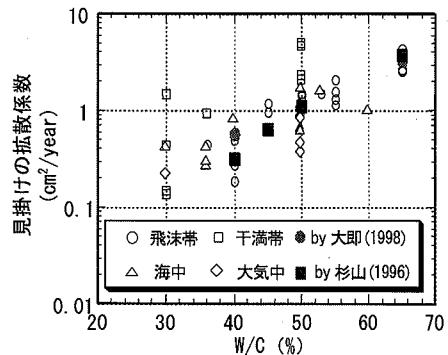


図-1 見掛けの拡散係数と水セメント比の関係<sup>3)</sup>

実構造物からの実測データの一部と比較して図-1<sup>3)</sup>に示す。この結果によると、本規準(案)に基づいて得られた見掛けの拡散係数は、示方書の予測式より算定される値とほぼ類似する状況が確認でき、示方書に規定されたコンクリート構造物の耐久性照査に本規準(案)による結果が利用可能であると考えられる。

ただし、本規準(案)に規定する試験方法は、あくまでも実効拡散係数を求めるものであることから、その値を換算して求める見掛けの拡散係数が、示方書で定める耐久性照査へ確実に使用できるような高い信頼性を得るために、今後、環境条件や施工要因などが異なる場合も含めて、両者の相関性を得るためにより多くのデータの蓄積が必要となる。なお、浸せき法によって直接求められる見掛けの拡散係数と本試験方法を用いて得られる実効拡散係数から換算した見掛けの拡散係数は、その本質が異なることから、本規準(案)では両者の符号をそれぞれ $D_{ap}$ ,  $D_{ae}$ と区別して表記していることを付記する。

(文責：武若 耕司、杉山 隆文)

#### 参考文献

- 1) ASTM C 1202-94: Standard Method of Test for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration
- 2) NT BUILD 355-97: Concrete, Mortar and Cement Based Repair Materials: Chloride Diffusion Coefficient from Migration Cell Experiments
- 3) コンクリートの塩化物イオン試験方法の制定と標準化が望まれる試験方法の動向、土木学会 コンクリート技術シリーズ 55, 2003.

コンクリートの塩化物イオン拡散試験方法作成 WG  
武若耕司(主査)、杉山隆文(幹事)、石田哲也、上田隆雄、小林孝一、齊藤裕司、佐伯竜彦、佐々木孝彦、久田真、丸屋剛、守分敦郎、山田一夫、横田弘

(2004.6.16 受付)

# 電気泳動によるコンクリート中の塩化物イオンの実効拡散係数試験方法（案）(JSCE-G 571-2003)

## Test method for effective diffusion coefficient of chloride ion in concrete by migration

1. 適用範囲 この規準は、直流定電圧を用いた電気泳動方法により、コンクリート中で定常状態にある塩化物イオンの実効拡散係数を求めるための試験方法について規定する。なお、この規準は、鋼纖維などの導電性材料を混入したコンクリートには適用できない。

2. 引用規格 次に掲げる規格は、この規準に引用されることによって、この規準の規定の一部を構成する。これらの引用規格は、その最新版を適用する。

JIS A 1132 コンクリートの強度試験用供試体の作り方

JIS A 1108 コンクリートの圧縮強度試験方法

JIS K 0101 工業用水試験方法

JIS A 5664 タールエポキシ樹脂塗料

JIS K 8150 塩化ナトリウム（試薬）

JIS K 8576 水酸化ナトリウム（試薬）

3. 定義 この規準で用いる主な用語の定義は、次による。

a) 電気泳動 イオンがコンクリートの細孔溶液中を、電位勾配を駆動力として移動する現象

b) 定常状態 イオンの移動流束が、時間経過に対して一定である状態

c) 電気泳動試験による実効拡散係数 コンクリートの細孔溶液中に存在するイオンの電気泳動のし易さを表す係数。本規準では塩化物イオンを泳動の対象とするが、その場合の実効拡散係数は、塩化物イオンの固定化現象なども包含したコンクリート中のすべての塩化物イオンを対象とした見掛けの拡散係数とは異なる。以下、単に実効拡散係数と称する。

4. 原理 図-1に示すように、塩化物イオンを含む溶液と接しているコンクリート供試体の両側に直流の定電圧を印加すると、負電荷を持つ陰極側の塩化物イオンはコンクリートの細孔中を通って陽極側へ電気泳動していく。そして陽極側の塩化物イオン濃度の増加割合が一定に達したとき、細孔中の塩化物イオンは定常状態にあるとみなしてこのときの移動流束を測定する。定常状態における移動流束は、コンクリートの細孔構造や細孔溶液中のイオンの移動のし易さを反映しており、電気化学法則（Nernst-Planck の式）を適用して実効拡散係数を計算できる。

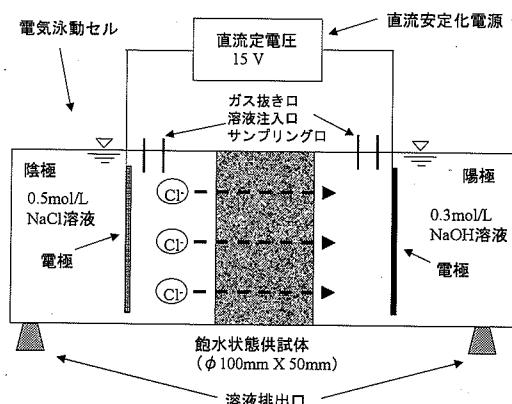


図-1 電気泳動試験装置

## 5. 試験装置 電気泳動試験用装置<sup>(1)</sup>は、次による。

<sup>注(1)</sup> 図-1は、試験装置の概略の一例を示したものである。

- a) 電気泳動セルは、セル溶液に対して十分に耐久性のある材料を使用して作製され<sup>(2)</sup>、下記6.により作製された供試体を挟んで左右にそれぞれ約1L（リットル）の容積を持つ陰極セルと陽極セルを有するものである。図-2および3に装置の形状・寸法の一例を示す。

注<sup>(2)</sup> アクリルなどの透明なプラスチック素材で作製するとよい。

- b) セル内溶液は、陰極側が $0.5\text{ mol/L}$ の塩化ナトリウム水溶液、陽極側が $0.3\text{ mol/L}$ の水酸化ナトリウム水溶液とする<sup>(3)</sup>。

注<sup>(3)</sup> 塩化ナトリウムおよび水酸化ナトリウムは、JIS K 8150 および JIS K 8576 に示す試薬あるいはこれと同等品とする。

- c) 直流安定化電源は、 $\pm 0.1$  V の変動内で安定した直流定電圧を継続して印加できるものを使用する<sup>(4)</sup>。

注<sup>(4)</sup> 供給可能な電流量の範囲が0~1Aであるような電源が望ましい。

- d) 陽極ならびに陰極として用いる電極は、試験期間を通じて電気化学的に安定で、試験結果に影響を与えない材質のものとする<sup>(5)</sup>。また、形状・寸法は、円形や角形の板状などで、供試体断面積の6割以上をカバーできるものとする。

注<sup>(5)</sup> 陰極側の電極にはステンレス板、陽極側の電極にはカーボン板、チタン板、白金板などがある。なお、カーボン電極は消耗するので、試験回数に応じて適宜、新しいものと交換する。

- e) セル内溶液の温度測定用熱電対は、耐水性と耐薬品性を有し、温度測定範囲が $-10\sim+110^{\circ}\text{C}$ 、精度が $\pm 1^{\circ}\text{C}$ のものを使用する。
  - f) 供試体表面の電位測定器は、測定範囲が $0\sim99.9\text{ V}$ で精度が $\pm 0.1\%$ のものを使用する。

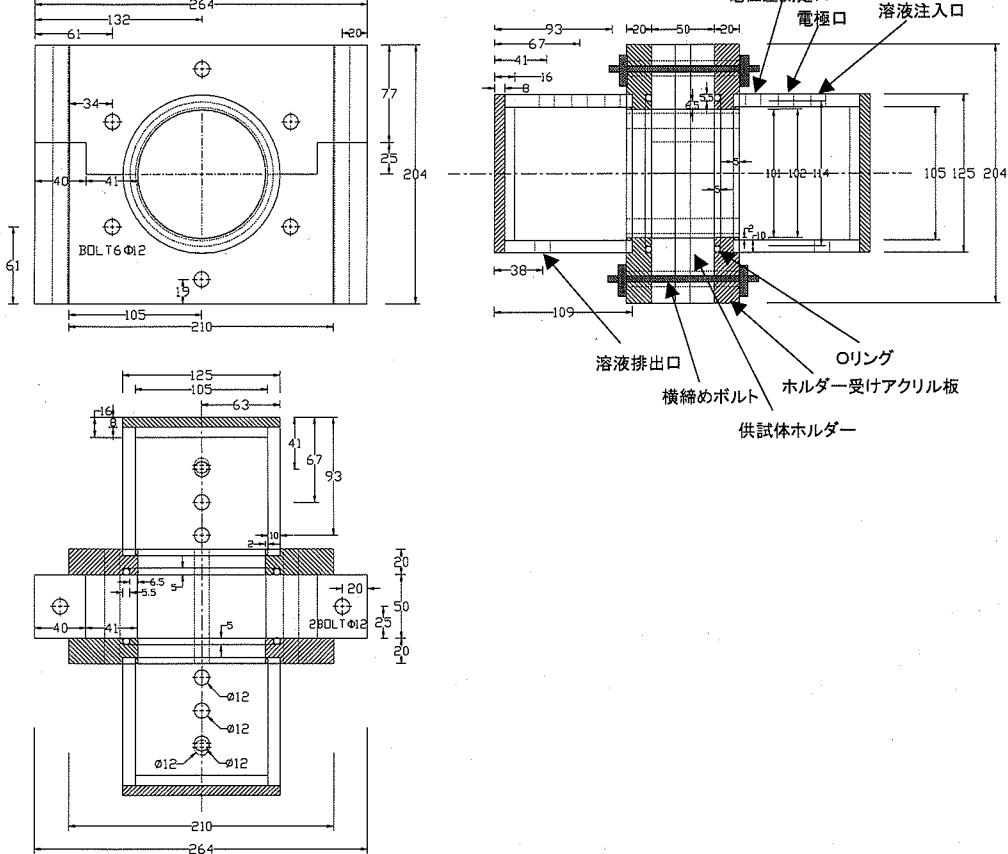


図-2 電気泳動セルの図面

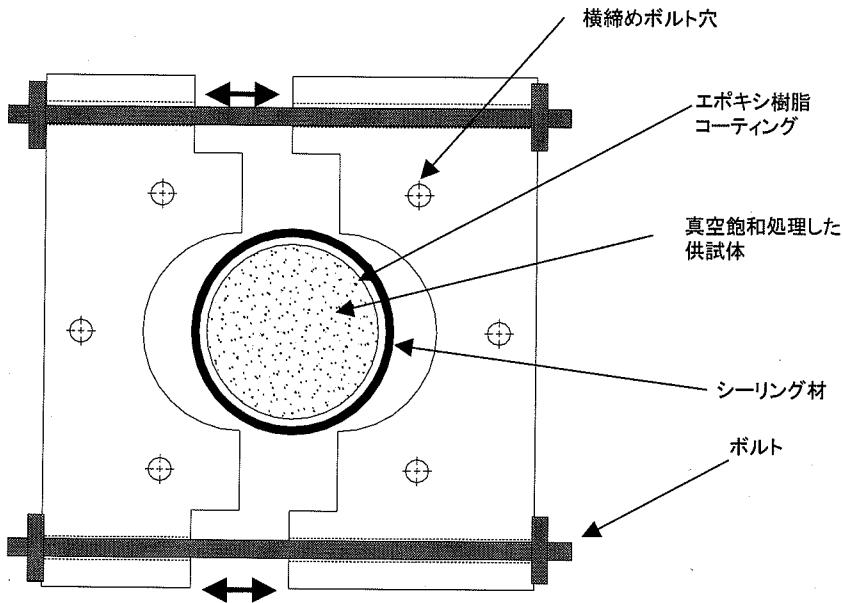


図-3 電気泳動セルの供試体ホルダー

## 6. 供試体

6.1 供試体の寸法 電気泳動セル装置に設置する供試体は、直径 100 mm、厚さ 50 mm の円盤型コンクリート供試体とする。なお、粗骨材の最大寸法は、25 mm を上限とする。

6.2 供試体の作製 供試体の作製は、次による。

- 直径が 100 mm、高さが 200 mm の円柱供試体を JIS A 1132 の規定によって作製する。
- 円柱供試体は、所定の期間<sup>(6)</sup>、JIS A 1132 に準拠して養生した後、湿式または乾式ダイヤモンドカッタで厚さ 50 mm に成形する。成形にあたっては、先ず a) で作製した円柱供試体の両端面から 25 mm の部分を除き、残った約 150 mm の部分から 1 本ないし 2 本の円盤型供試体を切り出す。

注<sup>(6)</sup> 養生期間は 28 日間を標準とするが、材料の種類などによって適宜変更する。

- 供試体の直径と厚さを、JIS A 1108 に準拠して正確に測定する。
- 円盤型供試体は 1 試験につき 3 体用意する。

6.3 供試体の前処理 供試体は、次のように前処理を行う。

- 6.2 で成形した円盤型供試体を室内 ( $60 \pm 5\%$  RH,  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ ) で 4 時間程度乾燥させた後、その円周面をエポキシ樹脂で被覆する<sup>(7)</sup>。

注<sup>(7)</sup> JIS K 5664 に規定する 1 種またはこれと同等の性能を有するエポキシ樹脂塗料を用いる。なお、コートィングの厚さは特に指定しないが、厚すぎるとセルへの供試体の設置に支障をきたす場合があるため注意する。

- 被覆したエポキシ樹脂が硬化するまで室内 ( $60 \pm 5\%$  RH;  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ ) に 4 日間以上放置する。この時、被覆していないコンクリート表面は、乾燥させないように注意する。
- コンクリートを水で飽和させるために、以下の手順で真空飽和処理を行う<sup>(8)</sup>。
  - 真空デシケータ内に置いたビーカー内に供試体を横置きにセットする。
  - 真空ポンプで吸引し、デシケータ内の真空度が 150 Pa 以下となる状態で 3 時間放置する。
  - 真空ポンプを稼動しながら、デシケータ内の供試体を入れたビーカーに供試体が水没するまで、蒸留水を注入する。この時、蒸留水中に空気を巻き込まないように注意する。
  - 蒸留水を注入して 1 時間後に真空ポンプを停止する。
  - デシケータ内に空気を戻して、1 日程度放置する。

注<sup>(8)</sup> 供試体内の空隙に水で飽和されていない部分が存在すると、その部分のイオンの透過性が無視され、試

験結果の誤差につながる。

6.4 試験装置への供試体設置 真空デシケータから取り出した供試体は、ただちにその質量を測定した後<sup>(9)</sup>、電気泳動セルに設置する。このとき、溶液槽と供試体の接触面にはシーリング材などを塗布し、セル溶液の漏れを防止する処置を施さなければならない。

注<sup>(9)</sup> 0.1 g のけたまで測定する。試験用装置への供試体の設置にあたって図-3 に示すようなホルダーを使用する場合には、ホルダーに供試体を設置後、ホルダーごと質量を測定してよい。

## 7. 試験方法

### 7.1 電気泳動試験 電気泳動試験は、次による。

a) 実験は、温度 20±2°C の恒温室内で実施する。

b) 電気泳動セル装置へ供試体をセットした後、陽極側および陰極側各セルにそれぞれ、5.b)に示した試験溶液を注入する。この時の試験溶液量は、供試体の両端面全体が完全に溶液に浸せきするまでとし、その体積 ( $V^I$ : 陰極側溶液の体積,  $V^{II}$ : 陽極側溶液の体積) を 0.01 L のけたまで計測する。なお、溶液注入後に液もれが無いことを確認しておく。

c) 直流安定化電源で、直流定電圧 15 V を電極間に印加する<sup>(10)</sup>。

注<sup>(10)</sup> 電気泳動試験では、水の電気分解が起こり陰極側では水素ガスが、陽極側では酸素ガスが少量発生する。

d) 試験期間を通じて、陰極側の塩化物イオン濃度が 0.45 mol/L を下回らないように、陰極側溶液を適宜新しい溶液に全量を交換する。一方、陽極側は塩化物イオン濃度が 0.05 mol/L を上回らないように、適宜新しい溶液に全量を交換する。

備考 特に、陽極側では塩素ガスや次亜塩素酸イオンが発生しないように、塩化物イオンの濃度管理および pH 管理が重要である。なお、溶液の交換で pH は 13 前後が保持される。

e) 電気泳動試験は、陽極側の塩化物イオン濃度の増加割合が一定になる定常状態まで継続する。通常、最低 5 回の測定でいずれも塩化物イオン濃度の増加割合が同じと認められた場合に、定常状態と判断して実験を終了できる。

### 7.2 測定項目および測定方法 測定項目および測定方法は、次による。

a) 電気泳動試験中は、所定の間隔で<sup>(11)</sup>電流値<sup>(12)</sup>、供試体面の電位差、溶液温度ならびに陰極側および陽極側の塩化物イオン濃度を測定する。また、試験終了後は、供試体の質量を測定する<sup>(13)</sup>。

注<sup>(11)</sup> 測定は、毎日行うことを標準とする。ただし、供試体の電気伝導度が小さなコンクリートを試験する場合には、測定間隔を長くしてもよい。

注<sup>(12)</sup> 電流測定は試験の管理用であり、異常値が測定された場合は、陰極室と陽極室との間の溶液漏れや断線などがないかを確認する。

注<sup>(13)</sup> 0.1 g のけたまで測定する。試験用装置への供試体の設置にあたって図-3 に示すようなホルダーを使用する場合には、ホルダーごとセルから取り外して質量を測定してよい。

b) 供試体両端面間の電位差の測定にあたっては、電位測定器の十端子を陽極側溶液内に、また一端子を陰極側溶液内にそれぞれ挿入し、できるだけ供試体表面に近い位置で供試体表面に端子が触れないようにして電位差を測定する<sup>(14)</sup>。なお、測定端子は、測定するときのみ溶液に挿入するものとし、通常は端子を溶液から取り出しておく。

注<sup>(14)</sup> 供試体面間の電位差は、電極間に印加した電位差 (15 V) よりも小さく、通常 13 V 前後になる。

c) セル溶液の温度の測定は、セル内に挿入した熱電対で行い、室温と同等であることを確認する<sup>(15)</sup>。

注<sup>(15)</sup> 溶液温度が上昇する原因の 1 つとして、供試体の電気伝導度が高く、大きな電流が流れることが考えられる。なお、熱電対は溶液温度の測定時に溶液中へ挿入する。

d) 両極のセル溶液中の塩化物イオン濃度の測定は、それぞれの溶液の一部 (5~10 mL) を採取し<sup>(16)</sup>、その塩化物イオン濃度を JIS K 0101 に準拠して測定することによって行う。溶液を採取する際には、各試験溶液をよく攪拌してから採取する。その際、供試体両端面の全体が常時試験溶液に浸せきしていることを確認する。

注<sup>(16)</sup> 採取した後に、採取した量 ( $V_t$ ) の溶液を加える必要はないが、各セル内の試験溶液量 ( $V_t^{I \text{ or } II}$ ) を計算して ( $V_t^{I \text{ or } II} = V^{I \text{ or } II} - \sum V_i$ )、流束を計算するときに使用する。また、水の電気分解によても溶液量はわずかに減少するが、その量は無視してもよい。

## 8. 計算

8.1 塩化物イオン流束の計算 定常状態<sup>(17)</sup>における塩化物イオンの流束は、次式によって有効数字4けた目を四捨五入し、有効数字3けたで算出する。

$$J_{cl} = \frac{V''}{A} \frac{\Delta C_{cl}^H}{\Delta t}$$

ここに、 $J_{cl}$ ：塩化物イオンの定常状態における流束 (mol/(cm<sup>2</sup>・年))

$V''$ ：陽極側の溶液体積 (L) (18)

$A$ ：供試体断面積 (cm<sup>2</sup>)

$\Delta C_{cl}^H / \Delta t$ ：陽極側塩化物イオン濃度の増加割合 ((mol/L)/年) (19)

注<sup>(17)</sup> ここでいう定常状態は、図-4に示すように、陽極側の塩化物イオン濃度の経時変化が一定の傾きをもって変化しているとみなされる状態として判断できる。

注<sup>(18)</sup> 定常状態における流束の計算に必要な陽極側の溶液体積は、定常状態における溶液体積の平均値を使用する。

注<sup>(19)</sup> 陽極側溶液中の塩化物イオンの増加割合を求めるためには、陽極側溶液を交換するごとに、交換直前の塩化物イオン量を交換後の測定値に加えた塩化物イオン濃度が用いられる。図-4は、このようにして求めた塩化物イオン濃度の経時変化の一例である。

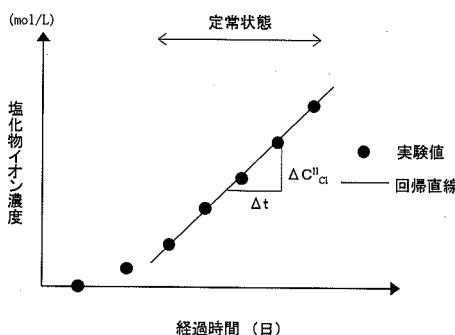


図-4 陽極側溶液中の塩化物イオン濃度 ( $C_{cl}^H$ ) の経時変化

8.2 塩化物イオンの実効拡散係数の計算 コンクリートの塩化物イオンの実効拡散係数は、次式によって有効数字4けた目を四捨五入し、有効数字3けたで算出する。

$$D_e = \frac{J_{cl} R T L}{|Z_{cl}| F C_{cl} (\Delta E - \Delta E_c)} \times 100$$

ここに、 $D_e$ ：実効拡散係数 (cm<sup>2</sup>/年)

$R$ ：気体定数 (8.31 J/(mol·K))

$T$ ：絶対温度測定値 (K) (20)

$Z_{cl}$ ：塩化物イオンの電荷 (= -1)

$F$ ：ファラデー定数 (96,500 C/mol)

$C_{cl}$ ：陰極側の塩化物イオン濃度測定値 (mol/L) (20)

$\Delta E - \Delta E_c$ ：供試体表面間の測定電位 (V) (20)

$L$ ：供試体厚さ (mm)

注<sup>(20)</sup> 実効拡散係数の計算に必要な絶対温度、陰極側の塩化物イオン濃度、供試体表面間の測定電位は、定常状態で測定した各値の平均値を使用する。

## 9. 報告

9.1 必ず報告する事項 必ず報告する事項は、次による。

a) 供試体の材料と配合

b) 供試体の寸法

c) 養生方法とその日数、試験開始までの経過日数

- d) 陽極側の溶液体積の経時変化（各溶液採取後の計算残量）および、定常状態におけるその平均値
- e) 陽極側の塩化物イオン濃度の経時変化（図-4）および、定常状態におけるこの塩化物イオン濃度の増加割合
- f) 定常状態の流束の計算結果
- g) 電流および溶液温度の経時変化
- h) 陽極側溶液の塩化物イオン濃度の経時変化および、定常状態におけるその平均値
- i) 供試体表面間の電位差の経時変化および、定常状態におけるその平均値
- j) 電気泳動試験による実効拡散係数<sup>(21)</sup>

注<sup>(21)</sup> 3体の円盤型供試体を試験して得られたそれぞれの計算値およびこれらの平均値を示す。なお、個々の値に異常値がある場合は、その数だけ再試験を行う。なお、試験上の異常値は、初期の電流値や絶対的な電流値の増減などで判断できる場合があるので、その場合は試験を中止して、新たな供試体で試験を行う。

- k) 試験年月日
- l) 試験機関

#### 9.2 必要に応じて報告する事項 必要に応じて報告する事項は、次による。

- m) 陰極側の溶液体積の経時変化（各溶液採取後の計算残量）
- n) 溶液の交換時期
- o) 試験前後の質量変化
- p) 電気泳動試験による実効拡散係数から換算した見掛けの拡散係数<sup>(22)</sup>

注<sup>(22)</sup> 「附属書：電気泳動試験による実効拡散係数を用いた見掛けの拡散係数計算方法（案）」に基づいて計算した値

### 附属書 電気泳動試験による実効拡散係数を用いた見掛けの拡散係数計算方法（案）

#### 1. 適用範囲 この附属書は、電気泳動試験により推定した実効拡散係数を用いて、コンクリート中の塩化物イオンの見掛けの拡散係数を計算する方法について規定する。

**備考** 電気泳動試験は、塩化物イオン浸透に対する抵抗性が大きく、浸せき方法による試験で塩化物イオンの見掛けの拡散係数を求めるためには浸せき期間が著しく大きくなるようなコンクリートについて、一般に適用される。しかし、推定した実効拡散係数は、見掛けの拡散係数とは異なるので、計算によって実効拡散係数を見掛けの拡散係数へ変換する必要がある。

#### 2. 定義 この附属書で用いる主な用語の定義は、次による。

- a) 塩化物イオンの見掛けの拡散係数 塩化物イオンがコンクリートの細孔溶液中で固定化をともないながら濃度勾配を駆動力として移動するとき、全塩化物イオンを対象として拡散の速さを規定する係数。以後、特に断りがない限りは、単に見掛けの拡散係数と略して示す。
- b) 全塩化物イオン 硬化コンクリートの細孔溶液にある塩化物イオン、塩として固定されている塩素および吸着されている塩素すべてをさし、硝酸によって抽出される塩化物イオンの量。

#### 3. 計算方法 計算は次による。

##### 3.1 実効拡散係数から見掛けの拡散係数への変換 見掛けの拡散係数は次式から計算して、有効数字4けた目を四捨五入し、有効数字3けたにする。

$$D_{ae} = k_1 \cdot k_2 \cdot D_e$$

ここに、  $D_{ae}$  : 電気泳動試験による実効拡散係数から換算した見掛けの拡散係数 ( $\text{cm}^2/\text{年}$ )

$D_e$  : 電気泳動試験による実効拡散係数 ( $\text{cm}^2/\text{年}$ )

$k_1$  : コンクリート表面におけるコンクリート側、陰極側溶液側それぞれの塩化物イオン濃度の釣り合いにかかる係数<sup>(1)</sup>

$k_2$  : セメント水和物中の塩化物イオンの固定化現象にかかる係数

**備考** 本計算方法によって得られる見掛けの拡散係数は、実効拡散係数をもとに推定したものであることから、土木学会のその他の試験方法、JSCE-G 572-2003：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およびJSCE-G 573-2003：実構造物におけるコンクリート中の全塩化物イオン分

布の測定方法、から求められる見掛けの拡散係数とは必ずしも一致しない。そこで、本計算による見掛けの拡散係数を「電気泳動試験による実効拡散係数から換算した見掛けの塩化物イオン拡散係数 ( $D_{ae}$ )」と表記し、区別することにした。

注(1) 溶液と接するコンクリートの空隙にある自由な塩化物イオンの濃度をコンクリートの単位容積あたりの質量へ換算するために必要な係数

3.2  $k_1, k_2$  の与え方  $k_1, k_2$  は、セメントの種類やセメント水和物量に影響を受ける係数で、一般に、固定化などによってコンクリート中を自由に拡散する塩化物イオンの濃度が低くなるほど小さな値となる。固定化される塩化物イオンの濃度と拡散する塩化物イオンの濃度が線形関係とみなされる場合には、 $k_1 \cdot k_2$  は次式で表されるとしてよい。

$$k_1 \cdot k_2 = \frac{1}{\varepsilon} \cdot \left( 1 - \frac{C_b}{C_{total}} \right)$$

ここに、 $\varepsilon$ ：コンクリートの空隙率 ( $\varepsilon = V_{pore}/V_c$ )

$V_{pore}$ ：コンクリート中の空隙容積(?)

$V_c$ ：コンクリートの容積

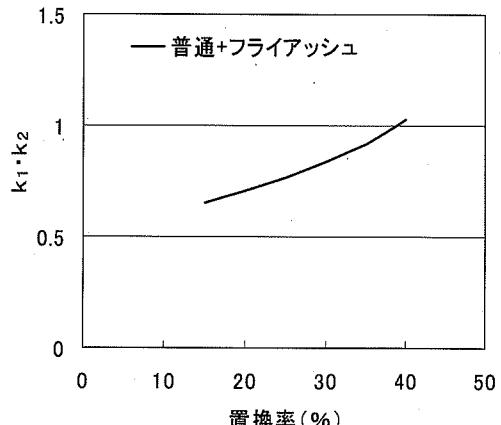
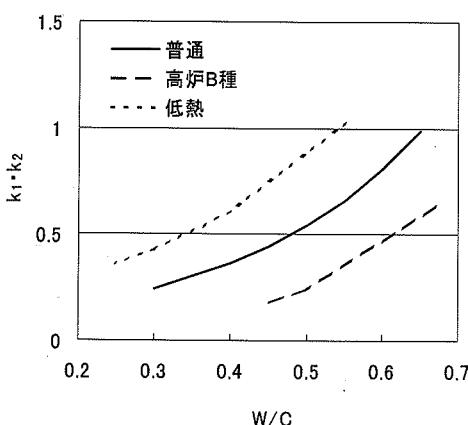
$C_b$ ：コンクリート中に固定化された塩化物イオンの濃度

$C_{total}$ ：コンクリート中の全塩化物イオンの濃度

備考 陰極側溶液の塩化物イオン濃度がコンクリート中の空隙にある溶液の塩化物イオン濃度と釣り合っていると考えるならば、 $k_1$  は理論的には上式右辺のコンクリートの空隙率の逆数と一致する。しかし、塩化物イオンがコンクリート中の全ての空隙へ自由に移動できるかどうかは未だ定かではなく、 $k_1$  の設定にあたってはこの点の考慮も必要となる。一方、 $k_2$  は、固定化される塩化物イオン濃度と拡散する塩化物イオン濃度が線形である場合、 $(1 - C_b/C_{total})$  と一致し、コンクリートの全塩化物イオンの濃度に対する固定化された塩化物イオンの濃度の比 ( $C_b/C_{total}$ ) によって決定できる。ただし、これについても、固定化塩化物イオン濃度と拡散塩化物イオン濃度との間には線形関係にある濃度範囲は限られているとする見方もあり、考慮を要する。

参考図-1 および 2 は、本規準に基づいて得られたコンクリートの実効拡散係数と同様のコンクリートを 1 年以上塩分環境に浸せきさせた結果から得られた見掛けの拡散係数を比較した結果から、セメントの種類、水セメント比、混和材置換率に応じた  $k_1 \cdot k_2$  の値を推定したもので、電気泳動試験より求めた実効拡散係数から見掛けの拡散係数を算出する際の参考とできる。

注(2) 厳密には、塩化物イオンが移動できる空隙容積となる。



参考図-1 普通ポルトランドセメント、高炉セメント B 種、低熱ポルトランドセメント

参考図-2 普通ポルトランドセメント+フライアッシュ  
(水結合材比: 0.45~0.55, 置換率: 内割り)