

## 【委員会報告】

# 土木学会規準「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) (JSCE-G 572-2003)」の制定

JSCE STANDARDS "TEST METHOD FOR APPARENT DIFFUSION COEFFICIENT OF CHLORIDE ION IN CONCRETE BY SUBMERGENCE IN SALT WATER"

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

コンクリート標準示方書（以下、示方書と称す）[施工編]（2002年制定）では、塩化物イオンのコンクリート中への侵入に伴う鉄筋腐食に関する照査を行うために、コンクリートの配合設計にあたって、予定配合コンクリートの見掛けの拡散係数の予測をすることが求められる。そして、この見掛けの拡散係数は、種々の実構造物や自然暴露供試体から得られた見掛けの拡散係数のデータを水セメント比の関係で回帰分析して得られた式から予測するのが、一般的である。このようにして予測される見掛けの拡散係数は、その予測のベースが多数の実構造物であるため、予測結果の中には材料の種類や配合だけでなく環境要因、施工要因などがすべて包含され、ある程度実状に即した値となるが、一方で、値が大きくばらつくデータの中からの予測であることもまた、事実である。そこで、このような推定式から拡散係数を予測するのではなく、実構造物に使用されるコンクリートと同等のコンクリートの見掛けの拡散係数を試験によって直接測定し、その結果に基づき、実際に使用されるコンクリートの値を予測することができれば、より合理的かつ信頼性の高い照査が可能になると考えられる。

本規準（案）は、以上のような経緯から制定されたものであり、示方書に基づいてコンクリートの塩化物イオンに対する拡散係数の照査を行う際に用いる見掛けの拡散係数を直接求める試験方法を規定するものとして、位置づけられる。

## 2. 試験法の解説

### （1）見掛けの拡散係数 ( $D_{ap}$ ) の定義

本規準（案）で規定する方法は、塩化ナトリウム水溶液にコンクリート供試体を浸せきし、コンクリート内部の塩化物イオンの浸透状況から塩化物イオンの見

掛けの拡散係数を求める方法である。このような試験環境における塩化物イオンの浸透は、通常、その移動流束が時間経過に対して一定でない、非定常状態で生じる。また、図-1に示すように、塩化物イオンはコンクリートの細孔溶液中にあって、コンクリート組織中への塩としての固定化や電気的な吸着をともないながら濃度勾配を駆動力として移動する。

すなわち、実際にコンクリート中を移動する塩化物イオンは、図-1に示す細孔溶液中の塩化物イオンであるが、コンクリート中からこの塩化物イオンのみを抽出することはそれほど容易ではない。そこで、多くの場合、細孔溶液中の塩化物イオンのほか、固定や吸着されている塩素すべてを含めた、いわゆる全塩化物イオンを測定して、塩化物イオンの浸透状況を求めることがなされる。また、示方書においても、鋼材の腐食発生の指標としてコンクリート中の全塩化物イオンの量が定められていることから、この全塩化物イオンのコンクリート中における分布をもとに算出される塩化物イオンの拡散係数を、見掛けの拡散係数 ( $D_{ap}$ ) として定義することが実用的である。

### （2）供試体

浸せき試験に用いる供試体は、JIS A 1132により作製した直径 100 mm、高さ 200 mm の円柱供試体の上下 25 mm 程度をカットしたものとする。上下部をカットしたのは、供試体作製時に生じるブリーディングなどの材料分離の影響を除くためである。なお、実構造物における塩化物イオンの浸透では、多くの場合、深さ方向については半無限条件と仮定できるが、供試体中の浸透においては、浸透速度が速い場合などで、カット後の高さである 150 mm では半無限条件とならないことも予想される。このような状況が予想される場合は、あらかじめ供試体の高さが試験結果に影響しないことを確認しておく必要がある。

供試体を試験に供するにあたっては、試験面以外の面をエポキシ樹脂塗料で被覆する必要があり、この塗

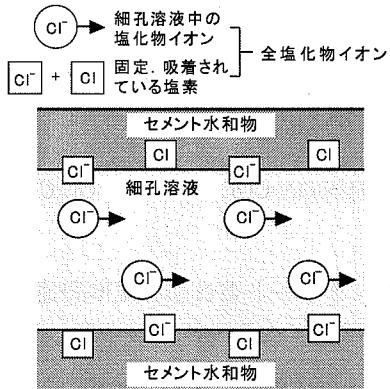


図-1 全塩化物イオンの構成<sup>1)</sup>

装のため、一時的にコンクリート表面を乾燥させなければならない。また、被覆後は、エポキシ樹脂を硬化させるため、一定期間水に接触させてはならない。そこで、本試験方法では、一般的なエポキシ樹脂塗料の実績から、乾燥期間を12時間程度、水に接触させない期間を4日間以上とした。ただし、この乾燥工程によりコンクリート中の含水状態が大きく変化すると、塩化ナトリウム溶液に浸せきする際、サクションなどの拡散以外の現象によっても塩化物イオンがコンクリート中に侵入することが懸念される。このため、エポキシ樹脂塗料の被覆にあたっては、供試体が激しく乾燥しないように十分に注意する必要がある。本試験方法では、エポキシ樹脂硬化後に24時間以上水中保存し、エポキシ樹脂被覆前に乾燥させた部分を吸水させることとした。また、エポキシ樹脂塗料の付着性や塩化物イオンの浸透に影響を及ぼす可能性があるため、型枠はく離材として油類は用いない。

供試体の養生期間は28日間を標準としたが、早強性のセメントを使用する場合や低熱セメントなどの水和反応速度の遅いセメントを使用する場合には、その反応性に応じて、養生期間を適宜変更できるとした。

### (3) 試験方法

浸せき溶液は、海水中の塩化物イオン濃度の約3倍に相当する濃度10%の塩化ナトリウム溶液であり、海水環境をそのまま再現したものとはなっていない。しかし、飛沫帯などの乾湿繰返しを受ける環境では、コンクリート表層部の細孔溶液中の塩化物イオンは10%の塩化ナトリウム溶液相当に濃縮されている状態も測定されている。したがって、この試験では、コンクリート表層部での塩化物イオンの濃縮現象がコンクリート内部の塩化物イオンの分布に与える影響をあらかじめ考慮したものとなっている。また、浸せき溶液の濃度が高いことによって、コンクリート中への塩化

物イオンの浸透量が大きくなり、ある程度緻密なコンクリートでも比較的短時間で塩化物イオンの分布を測定できるメリットもある。以上のことから、本試験方法では浸せき溶液として濃度10%の塩化ナトリウム溶液を使用することとした。

供試体を溶液に浸せきさせるのに最低必要な日数として91日を設定した。これは、塩水に浸せきする期間の目安を設定することによって、試験結果を同じ条件で比較することが可能となり、さらにその標準を91日とすることによって、なるべく深い位置まで塩化物イオンを浸透させ、かつ、試験期間が極端に長くなるのを避けるためである。ただし、低水セメント比のコンクリートの場合には、91日程度の浸せきではその評価を十分に行うことができない可能性もある。このことから、91日を最低必要な日数として規定し、必要に応じて本規準（案）中に示されている表-1あるいは既往の測定結果などを参考として適宜浸せき日数を定め、試験を行うこととした。

### (4) 見掛けの拡散係数の求め方

浸せき試験後のコンクリートにおいて、深さの異なる原則として5箇所以上の場所で全塩化物イオンを測定し、その分布を回帰分析して見掛けの拡散係数を算出する。ここで、回帰分析に用いる全塩化物イオンは、測定された全塩化物イオンの値から、初期、すなわち打設段階からコンクリート中に含まれる全塩化物イオン( $C_0$ )の値を引いたものとする。これは、回帰分析では、浸せき溶液中から供試体内部に浸透する塩化物イオンのみが、その対象となることによる。

なお、この回帰分析にあたっては、見掛けの拡散係数と同時に、コンクリート表面の全塩化物イオン $C_{a0}$ も算出できるような手法を用いる必要がある。これは、この $C_{a0}$ がフィックの拡散方程式を解く際のコンクリート表面の境界条件に相当し、ある厚みを有するコンクリート表層部分の塩化物イオンの量や、コンクリートに接する溶液の塩化物イオン濃度などでこの境界条件に換えることができないためである。

（文責：武若 耕司、丸屋 剛）

### 参考文献

- 1) コンクリートの塩化物イオン試験方法の制定と規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、斎藤裕司、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)

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）(JSCE-G 572-2003)

Test method for apparent diffusion coefficient of chloride ion in concrete  
by submergence in salt water

1. 適用範囲 この規準は、塩化ナトリウム水溶液に浸せきすることにより、コンクリート中で非定常状態にある塩化物イオンの見掛けの拡散係数を求めるための試験方法について規定する。

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 1154 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

JIS K 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 R 6252 研磨紙

JSCE G 573 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

3. 定義 この規準で用いる主な用語の定義は、次による。

a) 非定常状態 イオンの移動流束が時間経過に対して一定でない状態。

b) 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見なしたとき、すべての塩化物イオンを対象として拡散の速さを規定する係数。以下、見掛けの拡散係数と略して示す。

c) 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。

d) 全塩化物イオン濃度 コンクリートの単位容積あたりに含まれる全塩化物イオンの質量

4. 供試体

4.1 供試体の寸法 浸せき試験に用いる供試体は、直径 100 mm、高さ 150 mm の円柱供試体とする。なお、粗骨材の最大寸法は、25 mm を上限とする。

4.2 供試体の作製 供試体の作製は、次の手順によって行う。

a) 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。このとき、はく離材として油を用いてはならない。

b) 供試体は、1 試験につき 4 体用意する。そのうちの 3 体を浸せき試験用に用い、残りの 1 体を初期に含まれる全塩化物イオンの調査用とする。

c) a) で作製した 4 体の円柱供試体を所定の期間<sup>(1)</sup>、JIS A 1132 に準拠して養生する。浸せき試験用供試体 3 体については、養生中の適当な時期に<sup>(2)</sup>、a) で作製した円柱供試体の両端面から約 25 mm 部分を切断除去して、高さ 150 mm 程度に成形する<sup>(3)</sup>。

注<sup>(1)</sup> 養生期間は 28 日間を標準とするが、コンクリートの種類などによって適宜変更する。

注<sup>(2)</sup> 4.3 に示す供試体の前処理に要する期間を考慮して、その時期を設定する。

注<sup>(3)</sup> 塩化物イオンの浸透が比較的早いと予想されるコンクリートの試験では、成形後の高さを測定して、供試体の高さが試験結果に影響しないことを確認するのがよい。

4.3 供試体の前処理 4.2 c) で成形した浸せき試験用供試体 3 体については、次のような前処理を行う。なお、前処理に要する時間は養生期間に含めるものとする。

a) 室内 (60±5% RH, 20±2°C) で 12 時間程度乾燥させた後、打込み側の円形の 1 面のみを残し、他の円形の 1 面および円周面をエポキシ樹脂塗料<sup>(4)</sup>で被覆する。このとき、円周面への被覆にあたっては、あらかじめコンクリート表面の薄いセメントペースト層を除去する<sup>(5)</sup>。

注<sup>(4)</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、プライマーを用いる場合は塩化物イオンが含まれていないことを確認する。

注<sup>(5)</sup> JIS R 6252 に規定する 100 番研磨紙を用いるとよい。

- b) 被覆したエポキシ樹脂塗料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。
- c) 被覆したエポキシ樹脂の硬化後、温度  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  の水中で 24 時間以上保存する。

## 5. 試験方法

### 5.1 供試体の浸せき試験 供試体の浸せき試験は、次による。

- a) 4.3において前処理を行った供試体 3 体を、温度  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 、濃度 10% の塩化ナトリウム水溶液中に<sup>(6)</sup>、所定の期間中<sup>(7)</sup>、被覆していない開放面全面が當時溶液に接するように完全に浸せきする。

備考 開放面の容器への接触や開放面どうしの接触がないように、供試体の間隔は 3 cm 以上とするものとする。このとき、供試体の開放面が沈殿物などで覆われないように横向きに浸せきするのが望ましいが、やむを得ず縦向きに浸せきする場合は、開放面が沈殿物などで覆われないように注意しなければならない。

注<sup>(6)</sup> 塩化ナトリウムは JIS K 8150 に示す試薬あるいはこれと同等品とする。

注<sup>(7)</sup> 浸せき期間は最低でも 91 日間とし、コンクリートの種類などによって適宜変更するものとする。なお、この浸せき期間の設定に当たっては表-1 を目安とすることができます。

表-1 塩化物イオンの浸透深さの目安 (単位: mm)

セメントの種類	W/C (%)	浸せき期間 (月)			
		3	6	9	12
普通ポルトランドセメント	40	10~15	20~25	30~35	40~45
	45	20~25	30~35	40~45	50~55
	50	30~35	40~45	50~55	60 以上
	60	40~45	55~60	60 以上	
高炉セメント	40	10~15	15~20	20~25	25~30
	45	15~20	20~25	25~30	30~35
	50	20~25	25~30	30~35	35~40
	60	25~30	30~35	40~45	50~55

- b) 浸せき溶液の量は、浸せきする供試体の合計の体積の 2 倍以上、かつ、溶液の表面が供試体の上面あるいは上端から 20 mm 以上高くなるようにする。また、蒸発により溶液が減らないように、供試体を浸せきするための容器にふたをして密閉するなどの対策を施す。
- c) 浸せき溶液の量が減少したときは、溶液の塩化物イオン濃度を測定し、その値が 11% を超えた場合には、10% の濃度になるように水を加えてよく攪拌し、希釈させる。
- d) 初期に含まれる全塩化物イオンを調査するために用いられる前処理を行っていない供試体 1 体については、塩化ナトリウム水溶液中の浸せきは行わず、養生後ただちに、高さ方向中央部から厚さ 10 mm の円盤型コンクリート試験片を切り出し、5.2 c) に示す分析を行い、コンクリートの単位質量あたりの全塩化物イオンを測定する。

### 5.2 全塩化物イオン分布の測定方法 コンクリート中の全塩化物イオン分布の測定方法は、次による。

- a) 浸せき試験が終了した供試体は、開放面に付着している塩化物イオンを取り除き<sup>(8)</sup>、開放面から適当な数箇所の異なる深さ位置において<sup>(9)</sup>、コンクリートカッターを用いてドライな状態で<sup>(10)</sup>、分析用のコンクリート試験片を切り出す。

備考 分析用コンクリート試験片の切出しあは、原則として 5 箇所以上について行うものとする。ただし、塩化物イオンの浸透深さが浅く、6. に示す回帰分析を行うための十分な試料を採取できない可能性がある場合には、塩化物イオンの浸透状況を予測できる範囲でこの点数を減らしてもよい。ただしその場合でも、少なくとも 3 箇所以上で試料採取を行わなければならない。

注<sup>(8)</sup> イオン交換水やエタノールを用いて軽く洗浄するのがよい。

注<sup>(9)</sup> コンクリート試験片を切り出す深さ方向の位置の決定にあたっては、浸せき後の供試体 1 体についてコ

ンクリートを深さ方向に割裂させ、割裂面に1/10 N 硝酸銀溶液を噴霧することによって塩化物イオンの浸透深さを確認し、その状況を参考とするとよい。なお、この供試体も拡散係数を測定するために使用してよい。また、浸せき期間と塩化物イオンの浸透深さの目安を示した表-1を浸透深さの目安とすることもできる。

注<sup>(10)</sup> 分析に必要な量の試料が得られるよう、試料の採取方法、厚さ、切断の位置あるいは間隔を適宜変更する。なお、試験片の採取深さとして、開放面から各試験片における厚みの中央までの深さ方向距離を測定しておく。

b) 切り出した試験片に付着しているエポキシ樹脂は、完全に除去しなければならない<sup>(11)</sup>。

注<sup>(11)</sup> エポキシ樹脂が付着していると、エポキシ樹脂中の塩素の影響によって塩化物イオン濃度の測定結果が不確かなものとなる。ただし、エポキシ樹脂の除去にあたっては、その除去によって分析に必要な量の試料を得られなくなることがないように、試料の採取量に注意しなければならない。

c) JIS A 1154に規定する試験方法に準拠して、試験片それぞれについてコンクリートの単位質量あたりの全塩化物イオンを求める。

## 6. 見掛けの拡散係数の求め方

6.1 測定結果の整理 5.で測定されたコンクリートの単位質量あたりの全塩化物イオンと試験片の採取深さ<sup>(12)</sup>との関係を整理する。

注<sup>(12)</sup> 図-1にコンクリートの単位質量あたりの全塩化物イオンと測定位置の関係を図示した一例を示す。

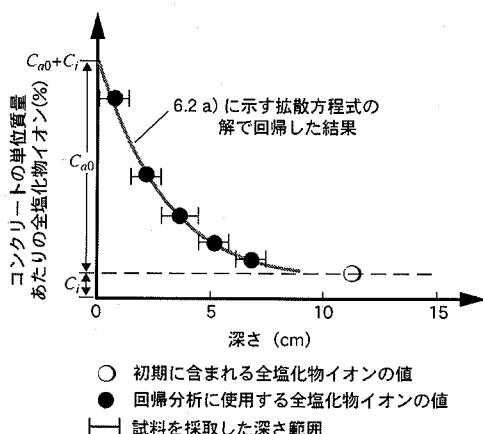


図-1 試料採取深さと全塩化物イオンの関係を示した一例

## 6.2 見掛けの拡散係数の算出

a) 次式に示すフィックの第2法則に基づいた拡散方程式の解を用いて、供試体ごとに各深さ位置で測定された全塩化物イオンの値を回帰分析し<sup>(13)</sup>、浸せき試験によるコンクリート表面の全塩化物イオン( $C_{a0}$ )<sup>(14)</sup>ならびに塩化物イオンの見掛けの拡散係数( $D_{ap}$ )を同時に算出し、これらを有効数字4けた目を四捨五入することによって有効数字3けたに丸める。

$$C(x, t) - C_i = C_{a0} \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{x}{2\sqrt{D_{ap} \cdot t}} \right) \right\}$$

ここに、  $x$ : 暴露面から全塩化物イオンを測定した箇所までの距離 (cm)

$t$ : 浸せき期間 (年)

$C(x, t)$ : 距離  $x$  (cm), 供用期間  $t$  (年)において測定されたコンクリート単位質量あたりの全塩化物イオン (%)

$C_{a0}$ : 浸せき試験によるコンクリート表面の全塩化物イオン。ここでは、コンクリート単位質量あたりの量として求められる (%)

$C_i$ ：初期に含有されるコンクリート単位質量あたりの全塩化物イオン (%)

$D_{ap}$ ：浸せき試験による見掛けの拡散係数 (cm<sup>2</sup>/年)

$erf$ ：誤差関数

$$\text{ただし, } erf(s) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^s e^{-\eta^2} d\eta \quad (15)$$

**備考** 本規準では、塩化ナトリウム水溶液中への浸せきという限られた条件下にあるコンクリート中の全塩化物イオンを測定している。したがって、ここで求められる見掛けの拡散係数やコンクリート表面の全塩化物イオンもまた、浸せき試験という限定された方法から算出される値であり、他の試験方法によって得られる値と必ずしも同じとなるとは限らない。そこで、本試験方法で得られる拡散係数を「浸せき試験による見掛けの拡散係数 ( $D_{ap}$ )」、コンクリート表面の全塩化物イオンを「浸せき試験によるコンクリート表面の全塩化物イオン ( $C_{ao}$ )」と表記し、他の方法によるものと区別することにした。

**注(13)** 回帰分析の方法には、正規確率紙を用いて図解的に回帰を行う方法、回帰分析のプログラムを利用し数値的に回帰を行う方法などがある。

**注(14)** 上式を用いる場合、その左辺に示されているように、測定された各試験片中の全塩化物イオンから初期に含まれる全塩化物イオンを差し引いた値を用いて回帰分析が行われる。したがって、コンクリート表面における全塩化物イオン ( $C_{ao}$ ) についても、初期に含まれる全塩化物イオンを含まない値として算出される。

**注(15)** 誤差関数の計算には、誤差関数表や近似式をもちいるとよい。

**b)** 試験を行った供試体 3 体からそれぞれ得られた見かけの拡散係数の平均値を、試験対象コンクリートの浸せき試験による塩化物イオンの見掛けの拡散係数とする。

## 7. 報告 報告は、次の事項について行う。

- a)** コンクリートの材料と配合
- b)** 養生期間
- c)** 浸せき期間
- d)** 全塩化物イオンの測定方法
- e)** 供試体それぞれについて、試験片ごとのコンクリートの単位質量あたりの全塩化物イオン<sup>(16)</sup>とその試験片の採取深さ<sup>(17)</sup>
- f)** 初期に含まれるコンクリートの単位質量あたりの全塩化物イオン<sup>(16)</sup>
- g)** 浸せき試験によって得られる、供試体それぞれの見掛けの拡散係数、ならびにその平均値
- h)** 浸せき試験によって得られる、供試体それぞれのコンクリート表面の全塩化物イオン<sup>(16)</sup>、ならびにその平均値
- i)** 試験機関
- j)** 試験年月日

**注(16)** 試料コンクリートの単位容積質量がわかっている場合には、コンクリートの単位質量あたりの全塩化物イオンを単位容積あたりの全塩化物イオンに換算し、全塩化物イオン濃度として有効数字 3 けたに丸めた値を記載してもよい。この場合は、試料コンクリートの単位容積質量も報告する。

**注(17)** 成形後の供試体の高さを測定している場合には、それも合わせて報告する。