

# 論文 高強度コンクリートの塩分浸透抵抗性

田中良樹\*1・藤田学\*2・河野広隆\*3・渡辺博志\*4

**要旨：** 高強度コンクリートの塩分浸透抵抗性を定量的に把握することなどを目的に、W/Cが25～55%のコンクリートについて塩水浸漬試験及び屋外暴露試験を実施した。また、これらの供試体の密実さや含水状態を把握するため、比導電率の測定を実施した。W/Cが25%までは、W/Cが小さいほど塩化物イオンの拡散係数Dcが小さいこと、塩水浸漬試験によるDcは、大気中に曝される構造物に対して過大になる可能性があることがわかった。

**キーワード：** 高強度コンクリート、塩害、塩化物イオン、拡散係数、比導電率

## 1. まえがき

設計基準強度が70～80MPaの高強度コンクリート(HSC)は、部材断面の縮小による軽量化、施工の省力化といったメリットがある他、高い耐久性が期待でき、橋梁等のライフサイクルコストの低減に寄与するものと考えられる。

HSCは密実なコンクリートであることから外部からの塩分、酸素、水分といった鋼材の腐食因子の浸透が普通のコンクリートに較べて遅いことが予想される。また、HSCは含水率が小さく、コンクリートの導電性が小さいことから腐食セルの形成を抑制する可能性もある。これらの点から、HSCは外部からの塩分浸透による鉄筋腐食を抑制する効果が期待されるが、これらの性質のほとんどがまだ定量的に把握されていない。

土木学会の耐久性照査型コンクリート標準示方書では、拡散方程式の解を基本としたコンクリート中の塩化物イオンの浸入に伴う鋼材腐食の照査法が示され、それに用いる拡散係数Dcも水セメント比W/Cの関数で示された。しかし、W/Cが50%以下ではW/Cを低減してもあまり拡散係数が低下せず、HSCの耐久性の面での効果を十分に発揮できない状況にある。この拡散係数の算定式は、多くの室内試験、暴露試験及び実構造物の調査から得られた、主としてW/Cが40～60%のデータに基づき示されたが、同25～30%のデータは少なかった。

これらの点を踏まえて、高強度域でのDcとW/Cの関係をより明確にするため、HSCを含むW/Cの異なるコンクリートを製作して、室内にて1年間の塩水浸漬試験を実施した。また、より実際の構造物の環境に近い状況でも塩分浸透抵抗性の比較検討を行うとともに室内の塩水浸漬試験の位置付けを把握するため、飛来塩分量が比較的多い日本海沿岸部において、室内試験と同一バッチで製作した大型ブロックの暴露試験を実施している。また、これらのコンクリートの密実さや含水状態を把握するため、比導電率の測定を実施した。本文は塩水浸漬試験、3年目までの屋外暴露試験及び比導電率測定の結果をとりまとめたものである。

## 2. 試験方法

### 2.1 コンクリート

表-1に試験体の配合を示す。コンクリートの練り混ぜはプラントでの実機練りとした。打設後3日目に脱型し、同約3ヶ月目まで室内の気中に放置した。表-2にコンクリートの基本性状を示す。

### 2.2 塩水浸漬試験

試験体はφ10cm×20cmの円柱である。気中養生の後、図-1に示すとおり5%の塩水に試験体の1/2を浸した。塩水の浸透を1方向にするため、円柱の側面にエポキシ樹脂を塗布した。浸漬後4,13,52週後に、浸透面から1cmごとに切断して、それぞれの全塩化物イオン量をJCI-SC4に基づき

\*1 国土交通省土木研究所 コンクリート研究室 研究員 (正会員)

\*2 (社)プレストレスト・コンクリート建設業協会 工修 (正会員)

\*3 国土交通省土木研究所 コンクリート研究室 室長 工修 (正会員)

\*4 国土交通省土木研究所 コンクリート研究室 主任研究員 工修 (正会員)

測定した。

### 2.3 屋外暴露試験

暴露試験体は図-2に示す90×90×30cmのブロックである。暴露後1,2,3年目にコア抜きを行い、塩化物イオンの浸透状況を測定した。コンクリートは室内試験と同バッチのものである。打設後3日目に脱型し、同約2ヶ月目まで室内の気中に放置した。その後、信濃川関屋分水の河口付近、海岸線から約20mのところ

にブロックを暴露した。図-2に示したように、ブロックの背後に建物があり、その壁との間は70~90cm程度である。側面はエポキシ樹脂で覆い、海側及び小屋側の2面を暴露した。また、コア採取後の孔の内面はすみやかに乾燥させてエポキシ樹脂を塗布した。採取したコアは中性化深さを測定した後、暴露面から1cmごとに切断して、それぞれの全塩化物イオン量を測定した。

この箇所の塩分環境を把握するため、暴露後2年間にわたって飛来塩分量を測定した。1年目及び2年目の年平均飛来塩分量(NaCl換算)はそれぞれ3.4, 5.0mddであった。

### 2.4 比導電率の測定

コンクリートの比導電率は、含水率と両対数軸上で直線性が強いことから、コンクリートの含水状態を示す指標であり、飽水状態での測定値はコンクリートの密実さを示す一つの指標となるものである<sup>2)</sup>。ここでは、塩分浸透抵抗性に及ぼすコンクリートの密実さや含水状態の影響を検討するため、塩化物イオンの測定に用いた供試体の予備を利用してコンクリートの比導電率を測定した。比導電率は図-3に示す方法により測定した。次式によって比導電率を算定した。温度の影響が大きいので

表-1 配合条件

配合番号	W/C (%)	s/a (%)	W (kg/m <sup>3</sup> )	C (kg/m <sup>3</sup> )	S (kg/m <sup>3</sup> )	G (kg/m <sup>3</sup> )	SP (%)	AE (%)	へースト量 (L/m <sup>3</sup> )
No.1	30	40	150	500	669	1031	1.8	0.006	310
No.2	40	40	173	433	667	1028	1.2	0.006	310
No.3	55	40	196	356	669	1030	0.5	0.006	310
No.4	30	40	130	433	711	1096	2.5	0.006	268
No.5	30	40	173	577	620	956	1.5	0.006	357
No.6	25	40	173	692	583	898	2.3	0.006	393

セメント: 早強ポルトランドセメント  
混和剤: ポリカルボン酸系

細骨材: 鬼怒川産川砂  
粗骨材: 岩瀬産砕石2005

表-2 打設結果及び圧縮強度試験結果

配合	スランブ (cm)	スランブフロー (cm)	空気量 (%)	練上時温度 (°C)	標準養生 (MPa)		気中養生 (MPa)	
					圧縮強度	弾性係数	圧縮強度	弾性係数
No.1	23	46×46	6.0	26	67.2	3.40E+04	60.5	3.22E+04
No.2	23	42×43	6.0	26	52.4	3.01E+04	45.7	3.01E+04
No.3	18.5	-	4.5	23	39.6	3.37E+04	34.1	2.88E+04
No.4	23	42×42	9.0*	26	60.2	3.44E+04	53.4	3.52E+04
No.5	18	-	5.2	25	75.3	3.58E+04	68.1	3.39E+04
No.6	-	57×55	5.5	26	86.6	3.43E+04	74.4	3.29E+04

\*) 振動後6.6%(参考値), 空気量目標値4.5%

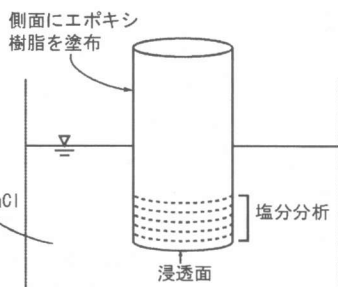


図-1 塩水浸漬試験

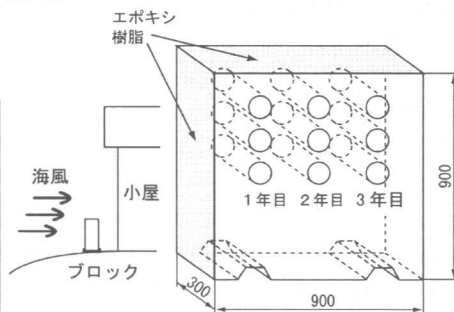


図-2 屋外暴露試験

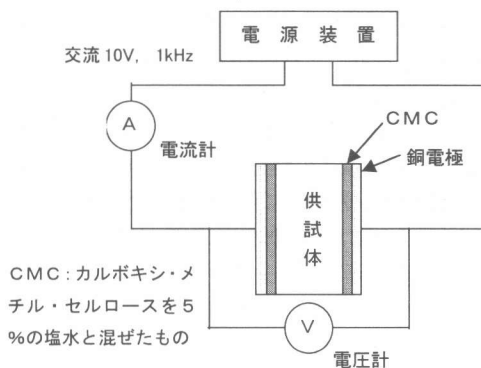


図-3 比導電率の測定方法

20°C相当の値に換算した<sup>2)</sup>。

$$\kappa = IL / VA \quad (1)$$

ここに、 $\kappa$ : 比導電率(1/( $\Omega \cdot \text{cm}$ ), 比抵抗の逆数),  $I$ : 交流電流 (A),  $V$ : 交流電圧 (V, 実効値),  $L$ : 供試体の長さ (cm),  $A$ : 供試体の断面積 (cm<sup>2</sup>)

いずれも打設後約16ヶ月目に測定した。塩水浸漬試験と同一バッチで作成した予備の供試体(塩

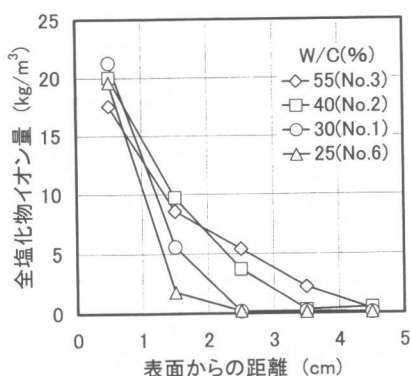


図-4 塩水浸漬試験結果(52週)

水浸漬は行わず、室内、気中に放置していたもの(は、急速塩分浸透試験の前処理で行われる真空飽水処理を施して、飽水状態とした上で比導電率を測定した。屋外暴露試験のブロックから採取した小屋側のコアの予備については、暴露ブロックから抜いたままの状態で行わずに比導電率を測定した後、真空飽水処理を施して再度比導電率を測定した。比導電率の測定は各コアを約5cm幅に切断した状態で測定した。

### 3. 結果

#### 3.1 塩水浸漬試験の塩化物イオンの浸透分布

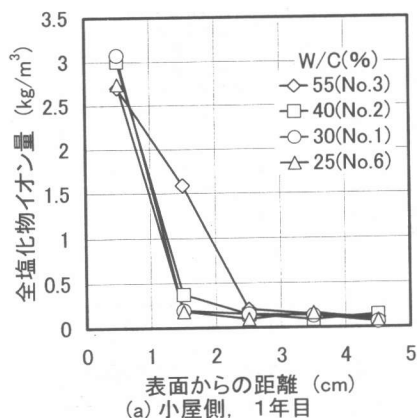
図-4に塩水浸漬試験における浸漬後1年目のコンクリート中の塩化物イオン分布を各配合ごとに示す。W/Cが30～55%の範囲で、W/Cが小さいほど塩化物イオンの浸透深さが小さい。また、W/Cが25%の方が同30%の場合より塩化物イオン量が少ない。これらの傾向から、W/Cが25～55%の範囲ではW/Cが小さいほど塩化物イオンの浸透速度が遅いことが確認できる。

#### 3.2 屋外暴露試験の塩化物イオンの浸透分布

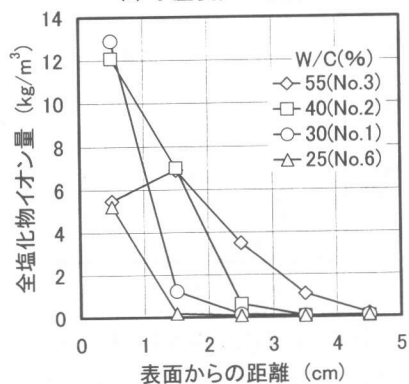
図-5(a)に屋外暴露試験における暴露後1年目の小屋側のコンクリート中の塩化物イオン分布を各配合ごとに示す。W/Cが55%の場合を除いて暴露期間が1年ではまだW/Cの違いによる塩化物イオンの浸透深さ、浸透量に顕著な差が見られない。同様に暴露後3年目の結果を図-5(b)に示す。W/Cが小さいほど、塩化物イオンの浸透深さが小さく、塩化物イオンの浸透速度が遅い。

一方、海側では暴露後3年目でも小屋側に比べてコンクリート中の塩化物イオン量が少なかった。

小屋側の暴露後3年目の塩化物イオン浸透深さは、塩水浸漬試験1年目の結果と概ね同程度であった。塩化物イオンの供給量が異なる点を考慮



(a) 小屋側, 1年目



(b) 小屋側, 3年目

図-5 屋外暴露試験結果

しなければならぬが、概して塩化物イオンの浸透速度は塩水浸漬試験の方が、比較的厳しい塩分環境における今回の屋外暴露試験よりもなお早い傾向にある。

#### 3.3 比導電率の測定結果

図-6に比導電率の測定結果を示す。凡例中の数値は表面からの距離を示す。このうち0-5cmのものは暴露ブロックの表面を残したまま測定したものである。図-6のうち、同じバッチから得られた塩水浸漬試験の供試体と屋外暴露試験の供試体のそれぞれ内部のコンクリート片を飽水状態で測定した結果は、概ね同程度の比導電率であり、コンクリートの大きさの影響や養生の影響は小さかったことがわかる。塩水浸漬試験では、供試体の浸透面が湿潤状態に置かれているので、塩化物イオン量の測定に用いた箇所の比導電率もこれと同程度であったと推定される。次に、屋外暴露試験の結果のうち、気中のままと飽水状態のものを比べると、気中のままの方が乾燥の影響があるため比導電率が小さくなっていった。W/Cが大きいくほど、表面に近いほどそれらの差が大きい。屋外暴露試験

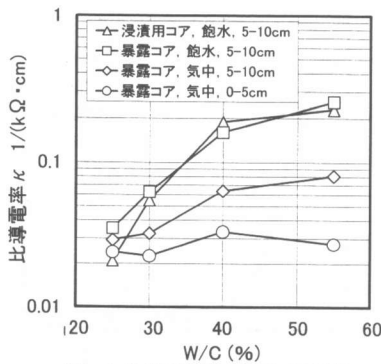


図-6 比導電率とW/Cの関係

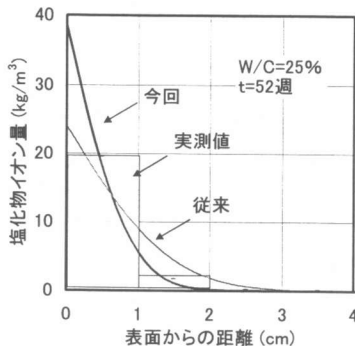


図-7 HSCの場合のあてはめの例

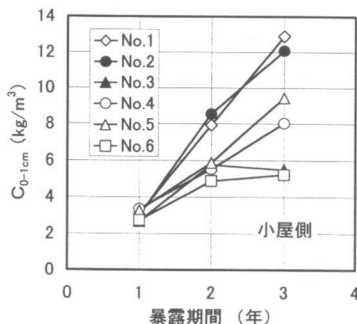


図-8 表層1cmまでの塩化物イオン量の経時変化

で塩化物イオンを測定した箇所の比導電率は飽水状態ではなく、気中のままの結果に近いものと考えられる。

#### 4. HSCのDcの算定方法の検討

##### 4.1 塩水浸漬試験の場合

塩化物イオン量の浸透速度をより適切に評価するためには、この浸透をフィックの拡散方程式に従うものと捉えて、その拡散係数Dcを指標に用いるのがよいと考えられる。塩水浸漬試験の場合、一次元の拡散方程式で、境界条件、初期条件を式(2)としたときの解である式(3)にあてはめてDcを算出する。

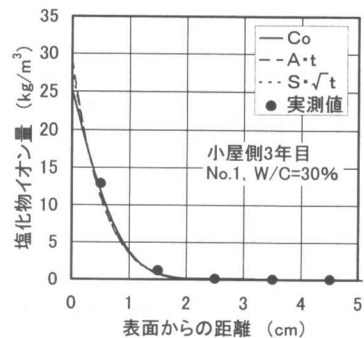


図-9 各境界条件でのあてはめ例

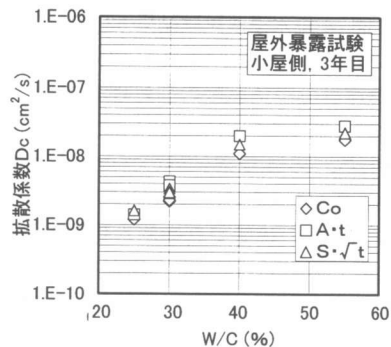


図-10 各境界条件でのDcの比較

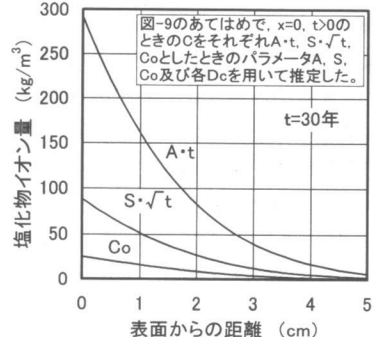


図-11 各境界条件での将来推定例

$$C=C_0, \quad x=0, \quad t>0 \quad (2)$$

$$C=0, \quad x>0, \quad t=0$$

$$C(x,t)=C_0\left(1-\operatorname{erf}\frac{x}{2\sqrt{Dc\cdot t}}\right) \quad (3)$$

ここに、x：表面からの距離、t：時間、erf()：誤差関数、C<sub>0</sub>：コンクリート表面の塩化物イオン量

図-7にあてはめの結果の一例を示す。この場合のDcの算出方法は文献3)などによる方法があり、ある程度のデータ数が得られている場合に概ね適切な方法である。しかし、この方法を用いてHSCのDcを短期間の試験結果で算出する場合、式(3)の分布がコンクリート表面にごく近い範囲で急激に変化することから、式(3)によるスライス幅

の範囲の平均値が実測値(スライス幅の範囲の平均値に相当)とできるだけ一致するようにDcを算出する必要がある。図-7の例では、今回の方法によると表面から0~1, 1~2, 2~3 cmの範囲の式(3)の積分値(面積)が実験値と同程度であり、あてはめが適切であったことがわかる。

#### 4.2 屋外暴露試験の場合

屋外暴露試験の場合、コンクリート表面の塩分量が時間により変化するので、厳密には境界条件が塩水浸漬試験の場合の式(2)と異なる。これまでに境界条件をCoの代わりに $t$ や $\sqrt{t}$ の関数と仮定したものや、不連続関数としたものなどのさまざまな文献が見られるが<sup>4)</sup>、その妥当性についてはいずれも十分に検証されていない。暴露試験において、コンクリート表面から1cmまでの表層部に含まれていた塩化物イオン量 $C_{0-1cm}$ を図-8に示す。 $C_{0-1cm}$ は暴露年数に応じてほぼ直線的に増加するか、あるいは上に凸の曲線となっていた。また、これまでの塩害を受けたコンクリート橋のコア採取による含有塩化物イオン量の調査によれば、供用後20年以上経過していても、コンクリート中の最大塩化物イオン量は概ね10 kg/m<sup>3</sup>程度までがほとんどであった<sup>5)</sup>。これらの点から、境界条件は $t^n$ の関数であり、 $n$ は0~1の範囲にあると考え、 $C=Co, A \cdot t, S \cdot \sqrt{t}$  (A,Sは定数)それぞれの場合について拡散方程式の解を求めた。図-9に暴露試験結果をこれらの解にあてはめた結果の一例を示す。このときのそれぞれのDcを図-10に示す。いずれの式を用いてもDcに大きな差は見られなかった。しかし、図-11に示すように、この結果による各パラメータを用いて将来推定を試みたとき、境界条件が $A \cdot t$ や $S \cdot \sqrt{t}$ の場合、わずか30年でも非現実的な塩化物イオン量の浸透状況となることがわかった。これらの結果から、境界条件は $t^n$ の関数で近似できるとしてもそのときの $n$ は0.5よりもさらに小さく、暴露後数年の後ほぼ $t$ の影響は無視し得る状況になるのではないかと推察される。これらの点を踏まえた上で、以下の検討では、屋外暴露試験の場合も塩水浸漬試験と同様に境界条件をCoとした式(3)によるDcを塩分浸透抵抗性の指標として用いる。

### 5. 考察

#### 5.1 DcとW/Cの関係

図-12に塩水浸漬試験から得られた全塩化物イ

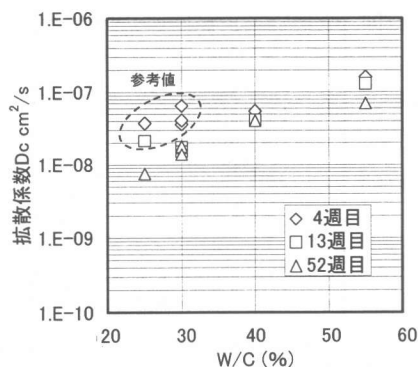


図-12 DcとW/Cの関係(塩水浸漬試験)

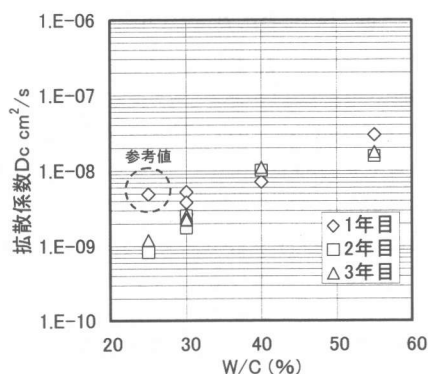


図-13 DcとW/Cの関係(屋外暴露試験, 小屋側)

オン分布に基づく材齢ごとのDcとW/Cの関係を示す。4.1の方法を用いても、塩化物イオンの浸透深さが1cmに満たない場合に適切なあてはめができなかったため、ここでは参考値として示した。浸漬後52週目では、DcとW/Cの関係は必ずしも直線関係ではないが、W/Cが低いコンクリートほどDcも低い傾向がある。

次に、図-13に屋外暴露試験から得られた材齢ごとのDcとW/Cの関係を示す。ここでは、塩化物イオンの浸透量が比較的多い小屋側のDcを示した。塩水浸漬試験と同様、屋外暴露試験においても、W/Cが低いコンクリートほどDcも低い傾向がある。

塩水浸漬試験において、Dcの適切な算出ができる程度の塩化物イオンの浸透が認められるコアでは、浸漬時間の増加に伴いDcが低下する傾向が見られた。これは水和に伴うコンクリートの緻密化等によるものと考えられる。一方、屋外暴露試験では暴露後2年目と3年目の間に顕著な差が見られなかった。

#### 5.2 塩水浸漬試験のDcと比導電率の関係

図-14にDcと比導電率の関係を示す。塩水浸

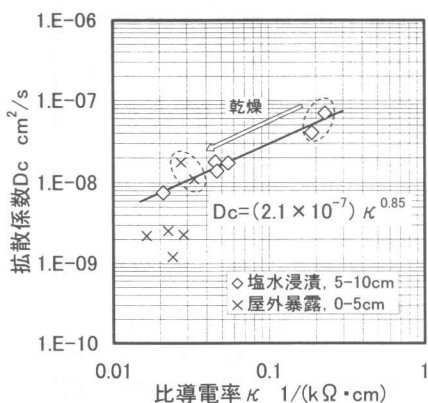


図-14 Dc と比導電率の関係

漬試験については、飽水状態での比導電率と Dc の間に強い相関関係があることがわかる(両対数軸上での相関係数 R=0.98)。図-12 のうち1年後の Dc と W/C の関係において、W/C が 55% の Dc は W/C が 40% の Dc と大差ない結果となっていたが、これは今回の W/C 55% のコンクリートが比較的密実であり、同 40% のものに近いものとなっていたためであることがわかる。

### 5.3 屋外暴露試験の Dc と比導電率の関係

図-14 の屋外暴露試験結果については、小屋側の気中のままの比導電率と Dc の関係を示した。Dc と比導電率の明確な関係は見られない。ただし、W/C が 40%、55% の場合は、乾燥の影響が表層から 5cm の範囲まで達しているとともに、塩化物イオンの浸透深さも概ねそれと同程度であったことから、Dc の算出に用いた部分の比導電率を比較的適切に示していると考えられる。この図では塩水浸漬試験から得られた Dc - κ の関係式に概ね沿って、比導電率の低下とともに Dc も低下していた。これは、Dc がコンクリートの密実さだけでなく、含水状態とも関係があることを示唆している。一方、W/C が 25 ~ 30% の場合、5cm 幅の供試体で測定した比導電率は、Dc の算出に有効であった表層部 2cm 程度までの比導電率と異なっていた可能性がある。

### 5.4 塩水浸漬試験と屋外暴露試験の Dc の比較

前掲図-12 に示した塩水浸漬試験の 52 週目(1 年目)の結果と図-13 に示した屋外暴露試験、小屋側の結果の比較より、塩水浸漬試験の方が屋外暴露試験の場合よりも Dc が大きいことがわかった。これは、5.3 の結果より乾燥の影響によるところが大きいと考えられる。これより、塩水浸漬試験による Dc は、屋外暴露試験と同様に大気中に

曝されるコンクリート構造物に対しては過大になる可能性があることがわかった。

## 6. まとめ

(1) 塩水浸漬試験及び屋外暴露試験のいずれにおいても、W/C が 25 ~ 55% の範囲では、W/C が小さいほど塩分浸透抵抗性を表す指標である拡散係数 Dc が小さい。

(2) 塩水浸漬試験において、Dc の適切な算出ができる程度の塩化物イオンの浸透が認められるコアでは、浸漬時間の増加に伴い Dc が低下する傾向が見られた。これは水和に伴うコンクリートの緻密化等によるものと考えられる。一方、屋外暴露試験では暴露後 2 年目と 3 年目の間に顕著な差が見られなかった。

(3) 塩水浸漬試験と屋外暴露試験では、同一のバッチのコンクリートをそれぞれ供試体に用いても拡散係数 Dc に大きな差が見られた。その原因として、屋外暴露試験のブロック表面の乾燥の影響が大きいと考えられる。これより、塩水浸漬試験による Dc は、屋外暴露試験と同様に大気中に曝されるコンクリート構造物に対しては過大になる可能性があることがわかった。

(4) 塩水浸漬試験から得られた拡散係数 Dc はコンクリートの密実さ及び含水状態を表す比導電率と両対数軸上で強い相関関係がある。

## 謝辞等

屋外暴露試験にご協力頂いている国土交通省信濃川下流工事事務所、同関屋出張所の関係各位にこの場を借りて感謝の意を表します。

本検討は国土交通省土木研究所及び(社)プレストレスト・コンクリート建設業協会(PC建協)による「現場打ち高強度コンクリートの設計施工法に関する共同研究」の一環として実施しました。比導電率の測定は土木研究所コンクリート研究室鹿島孝之交流研究員に協力をいただきました。

## 参考文献

- 1) 大野義照, 鈴木計夫, 田村博: ひび割れの生じた高強度コンクリート中の鉄筋腐食, セメント・コンクリート論文集, No.48, pp.536-541, 1994
- 2) 田中良樹, 河野広隆, 丁海文, 鹿島孝之: 硬化コンクリートの比抵抗と含水率の関係, 土木学会年次学術講演会 V, pp.532-533, 2000
- 3) 永野宏雄: 塩分汚染コンクリート構造物の診断手法の提案, 大成建設技術研究所報, 第 18 号, pp.69-73, 1986.3
- 4) 例えば, 丸屋剛, 宇治公隆: コンクリートへの塩分の拡散浸透に関する表面塩分量の定式化, コンクリート工学年次論文報告集, 11-1, pp.597-602, 1989
- 5) 例えば, コンクリート橋のライフサイクルコストに関する調査研究, 国土交通省, 土木研究所資料 3811 号, 2001.3