

論文 各種混和材を添加した高強度コンクリートの急速塩素透過性試験による評価

真下昌章*1・福手勤*2・濱田秀則*3・渡辺芳春*4

要旨：本研究は、港湾構造物を対象としてエトリンサイト生成系、シリカフェーム、高炉スラグ微粉末の各種混和材を添加した高強度コンクリートの塩化物イオン透過に対する抵抗性を急速塩素透過性試験により評価し、同時に行った海水保存試験との結果と併せて考察を加えたものである。各種混和材の添加によりコンクリートの塩化物イオン透過に対する抵抗性が向上することが明らかとなった。

キーワード：高強度、混和材、塩化物イオン、急速塩素透過性試験

1. はじめに

道路用融雪剤として塩化物が大量に散布される構造物におけるコンクリートの塩化物透過性を評価する方法として、急速塩素透過性試験（ASTM C 1202, AASHTO T-277）が米国やカナダなどで普及してきている。この試験は、所定の厚さのコンクリートの供試体の両端に60Vの電圧を与え、6時間の間に流れた電流量により塩化物の透過性を評価する方法である。超高強度コンクリートやポリマーコンクリートを含む広い範囲のコンクリートの塩化物透過性を短時間で簡単に評価できることが特長である。日本でもこの試験を用いた研究が増えてきているが、普通コンクリートやシリカフェーム、高炉スラグ微粉末など単一の混和材を添加したコンクリートによる試験が多い。

本研究は、耐久性（特に耐海水性）が問題となる港湾構造物を対象とし、各種混和材およびエトリンサイト生成系高強度混和材を添加した高強度コンクリートの塩化物イオン浸透性評価を急速塩素透過性試験により試みたものである。

2. 試験方法

2.1 供試体作製方法

使用材料は、普通ポルトランドセメント（OPC）、エトリンサイト生成系高強度混和材現場打ち用（Σ）および蒸気養生用（ΣS）、シリカフェーム（SF）、高炉スラグ微粉末（BFS）、新潟県姫川産川砂（S）および碎石（G）、高性能減水剤、水道水であり、セメントおよび混和材の化学成分を表-1に示す。

コンクリート配合は表-2に示す通りであり、粗骨材量を一定とし、水結合材比を30および40%と変化させた。混和材添加量は、現場打ち用エトリンサイト生成系混和材の場合10、15、20%と変化させ他は1水準のみとした。コンクリートの練混ぜは10012軸型ミキサを用いて行い、φ10×20cm型枠に打設し棒状バイブレーターで締め固めた。標準養生供試体は、打設後20℃で24時間湿空養生を行った後に脱型し、27日間水中養生を行ったうえで各々の条件下に保存した。蒸気養生供試

*1 テクノコンサルタント株式会社（正会員）

*2 運輸省港湾技術研究所 構造部材料研究室室長、工博（正会員）

*3 運輸省港湾技術研究所 構造部主任研究官、工修（正会員）

*4 電気化学工業株式会社 青海工場セメント・特混研究部 研究リーダー（正会員）

体は、打設後 20℃で2時間湿空養生し、それに続いて10℃/時間で昇温し70℃を3時間保持した後自然冷却した。蒸気養生終了後脱型し、27日間水中養生を行ったうえで各々の条件下で保存した。

2.2 保存条件

供試体の保存は、20℃恒温室に設置された海水槽で行い、海水は自然海水を使用した。比較として同室で水道水による真水保存を行った。海水および水道水は毎月1回定期的に交換した。

2.3 試験項目

(1) 圧縮強度試験

両端載荷面を研磨したφ10×20cmの円柱供試体を用いて、JIS A 1108に従い圧縮強度試験を行った。試験時の供試体の乾燥を防ぐため試験機の脇に水槽を置き試験直前に供試体を取り出して試験を行った。試験材齢は28日(保存開始時)および2ヶ月13ヶ月とした。

(2) 硝酸銀による塩化物イオン浸透深さ試験

供試体は、φ10×20cm円柱供試体をコンクリートカッターにより高さ方向に4分割し両端2個を用いた(図-1 供試体採取方法参照)。試験断面は水洗し十分に乾燥してから用いた。試験は晴天時の屋外で行い、供試体断面に0.1Nの硝酸銀溶液を刷毛で塗布・乾燥を数回繰り返した後、変色部を塩分の浸透深さとして測定した。なお、試験方法は大即らの手法[1]に従った。試験材齢は7ヶ月と13ヶ月とした。

(3) 急速塩素透過性試験

供試体は、図-1に示した中央部のφ10

表-1 セメントおよび混和材の化学成分

| | OPC | Σ | Σ S | SF | BFS |
|--------------------------------|------|------|------|------|--------|
| ig-loss | 2.1 | 11.2 | 2.4 | 3.4 | (+0.2) |
| insol | 0.2 | --- | --- | --- | 0.1 |
| SiO ₂ | 21.6 | 26.5 | 25.9 | 84.2 | 33.6 |
| Fe ₂ O ₃ | 3.0 | 1.9 | 1.2 | 8.9 | 1.1 |
| Al ₂ O ₃ | 5.3 | 3.2 | 3.3 | 1.0 | 14.9 |
| CaO | 64.0 | 30.9 | 32.8 | 0.5 | 19.8 |
| MgO | 0.9 | 2.6 | 2.3 | 0.4 | 7.4 |
| SO ₃ | 2.0 | 21.8 | 31.3 | 1.2 | 0.1 |
| TiO ₂ | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.4 | 1.1 |
| Na ₂ O | 0.31 | 0.91 | 0.62 | 0.34 | 0.24 |
| K ₂ O | 0.27 | 0.78 | 0.52 | 0.88 | 0.24 |

表-2 配合表

| No. | 記号 | 養生 | W/B | S/a | W | C | Ad | S | G | SP | |
|-----|-----------|----|-----|------|----------------------|-----|-----|-----|-----|------|-----|
| | | | (%) | | (kg/m ³) | | | | | | |
| 1 | OPC-30 | 標準 | 30 | 42.4 | 168 | 600 | 0 | 700 | 950 | 11.8 | |
| 2 | OPC-40 | | 40 | 47.0 | 167 | 440 | 0 | 843 | 950 | 8.8 | |
| 3 | Σ-30-10 | | 30 | 50.0 | 119 | 400 | 40 | 952 | 950 | 13.0 | |
| 4 | Σ-30-15 | | 30 | 49.1 | 132 | 400 | 60 | 917 | 950 | 5.7 | |
| 5 | Σ-30-20 | | 30 | 48.1 | 144 | 400 | 80 | 882 | 950 | 0 | |
| 6 | Σ-40-20 | | 40 | 49.1 | 144 | 330 | 80 | 984 | 950 | 0 | |
| 7 | SF-30-10 | | 30 | 41.7 | 166 | 540 | 60 | 679 | 950 | 14.3 | |
| 8 | SF-40-10 | | 40 | 46.5 | 167 | 396 | 44 | 827 | 950 | 8.8 | |
| 9 | BFS-30-40 | | 30 | 41.5 | 168 | 360 | 240 | 673 | 950 | 11.8 | |
| 10 | BFS-40-40 | | 40 | 46.4 | 167 | 264 | 176 | 823 | 950 | 8.8 | |
| 11 | OPCS-40 | | 蒸気 | 40 | 47.0 | 167 | 440 | 0 | 843 | 950 | 8.8 |
| 12 | ΣS-40-20 | | | 40 | 47.9 | 161 | 350 | 70 | 872 | 950 | 8.8 |
| 13 | SF-40-10 | | | 40 | 46.5 | 167 | 396 | 44 | 851 | 950 | 8.8 |
| 14 | BFS-40-40 | | | 40 | 46.4 | 167 | 264 | 176 | 847 | 950 | 8.8 |

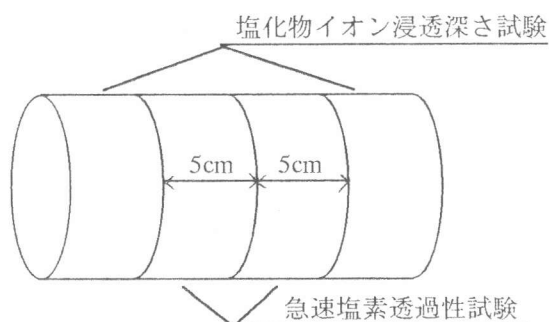


図-1 供試体採取方法

×5cm供試体2個を用いASTM C 1202およびAASHTO T-277に準じて行った。試験材齢は、7ヶ月と13ヶ月とした。

3. 実験結果

3.1 圧縮強度試験

圧縮強度試験結果を図-2(a)~(b)に示す。(a)には標準養生供試体を海水保存した場合の水結合材比の違いによる強度を示すが、 $W/B=30\%$ に比べ 40% の強度は $10\sim 20\%$ 低く、時間の経過に伴う伸びも小さい。 $W/B=30\%$ と 40% の強度の差は混和材種類や材齢毎にばらついているものの、標準コンクリートおよびエトリンナイト生成系混和材ではその差が大きい。

(b)に $W/B=40\%$ の供試体を海水保存した場合の混和材および養生条件の差による強度の違いを示す。標準養生された供試体に関しては、混和材の添加により強度が増加していることが分かる。蒸気養生の場合、初期強度は低いが、材齢による伸びが標準養生より大きい。

(c)に $W/B=30\%$ の供試体を海水保存した場合のエトリンナイト生成系混和材の添加量と強度の関係を示す。この図から 15% の添加量で最大の強度が得られることがわかる。

3.2 塩化物イオン浸透深さ試験

図-3に海水保存した供試体の塩化物イオン浸透深さ試験結果を示す。標準養生に比べ蒸気養生を施した供試体の方が浸透深さが大きくなっている。

水結合材比の違いによる浸透深さの差は顕著に現れており、 $W/B=40\%$ の場合の浸透深さは 30% の場合に比べほとんどの配合で大きい値を示している。混和材の種類としては高炉スラグ微粉末系での浸透が小さく次にシリカフェーム系、エトリンナイト生成系、標準コンクリートとなっており、この傾

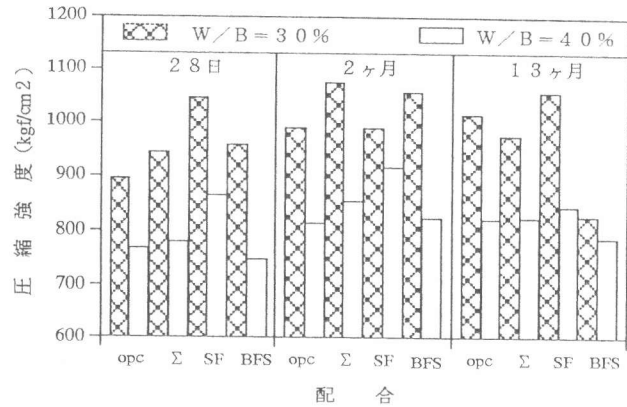


図-2 圧縮強度 (a) 水結合材比の影響

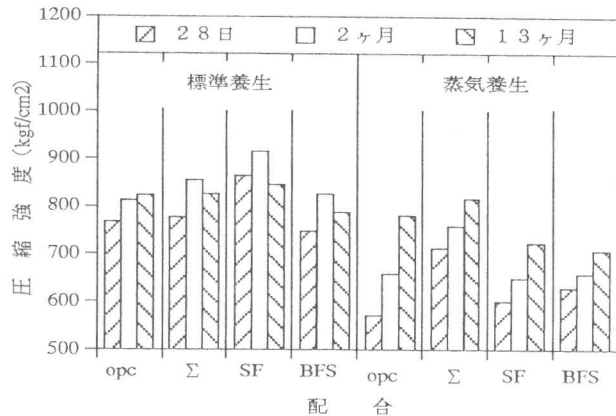


図-2 圧縮強度 (b) 養生条件の影響

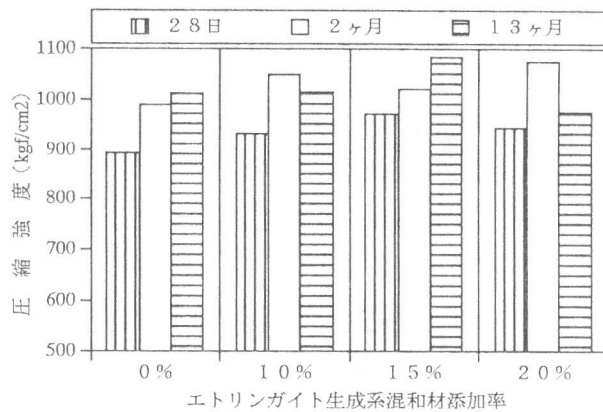


図-2 圧縮強度 (c) エトリンナイト系混和材の影響

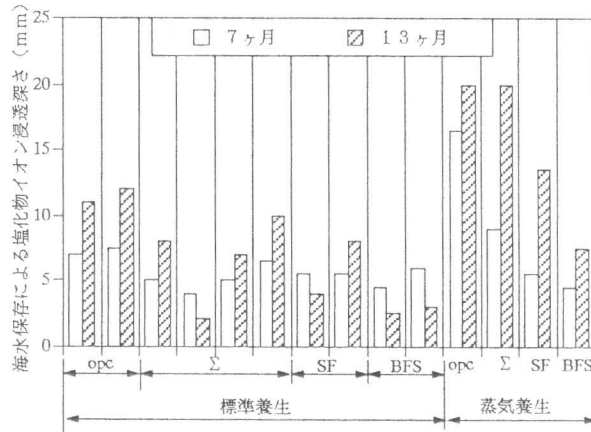


図-3 塩化物イオン浸透深さ

向は標準養生も蒸気養生も同様である。

3. 3 急速塩素透過性試験

(1) 試験結果と塩化物イオン浸透

急速塩素透過性試験は供試体両端に60Vの電圧を6時間かけたときに流れる電流を測定するものであり、コンクリート中のイオン透過の難易度を表すものとされているが、鳥居らの報告[2]によると高強度コンクリートでは塩化物イオンは供試体を透過せず断面途中までしか侵入しないことがわかっており、図-4に示すように今回の試験のE PMAによる測定でも同様の結果が得られている。

また、図-5に異なる2種類の試験での電流量と初期電流の関係を示す。電流量は6時間試験を行って得られた結果であり、初期電流とは試験開始時電圧をかけた直後の電流値である。データ1は本試験により得られた結果であり、データ2は大賀らに[3]より報告されている値である。電流量と初期電流値は非常に良い相関を示しておりデータ1、2とも傾向は同様である。

以上のことにより、今回の急速塩素透過性試験試験結果は実際にコンクリート中の塩化物イオンの移動のみを測定したのではなく、コンクリートの塩化物イオン浸透に対する抵抗性および電気抵抗性を含む複数性能を評価しているものと考えられる。

図-6に海水保存した供試体の塩化物イオン浸透深さと急速塩素透過性試験結果の関係を示す。塩化物イオン浸透深さは材齢7ヶ月と13ヶ月の平均値を用い、電流量は材齢13ヶ月の値を用いた。一般的に促進試験と保存試験の結果との関係は良好な対応がとれず、いずれのデータも単独で議論されることが多いが、本研究においては両者の間に比較的良好的な相関が認められる(相関係数:0.729)ためコンクリート海中部の塩化物イオン浸透状況の推定方法の1

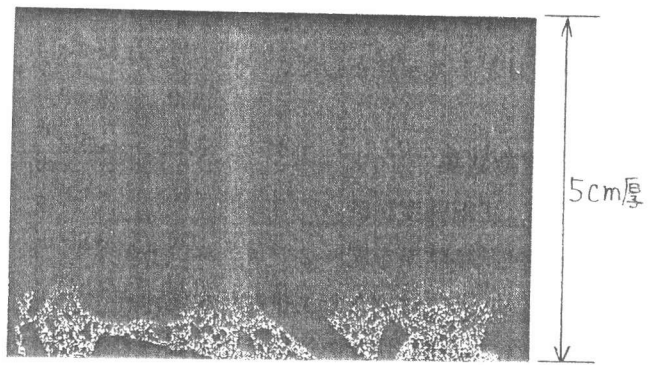


図-4 急速塩素透過性試験による塩化物イオン浸透状況

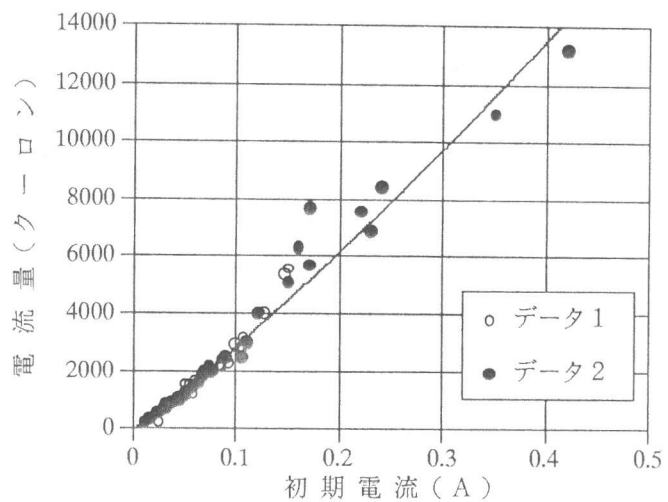


図-5 電流量と初期電流の関係

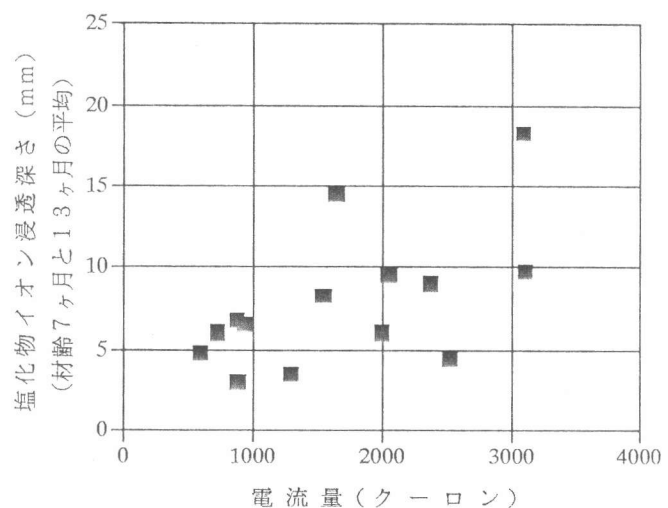


図-6 塩化物イオン浸透深さと電流量の関係

表-3 電流量による塩化物イオン透過性の評価と硝酸銀法による浸透深さ

| 電流量 (クーロン) | 塩化物イオン透過性 | 備 考 | 塩化物イオン浸透深さ 材齢13ヶ月 (mm) |
|---------------|------------|----------------------------------|------------------------------|
| 4000~ | High | (高) 水セメント比 (>0.6) 普通セメント使用 | |
| 2000~4000 | Moderate | (中) 水セメント比 (0.4~0.5) 普通セメント使用 | 5~25 |
| 1000~2000 | Low | (低) 水セメント比 (<0.6) 普通セメント使用 | 2.5~12 |
| 100~1000 | Vert Low | ラテックス混入コンクリート | 1~6 |
| ~100 | Negligible | ポリマー含浸コンクリート ポリマーコンクリート | ~3 |

手段として急速塩素透過性試験は有用と考えられる。表-3にAASHTOの基準および本研究の塩化物イオン浸透深さ試験結果を示す。本試験結果の電流量と水セメント比やコンクリート種類との関係はAASHTOの基準と同様の傾向を示している。

(2) 各種混和材の評価

図-7に各配合が急速塩素透過性試験に与える影響を示し、結果より各種混和材の塩化物イオン浸透性について考察する。

(a) 標準コンクリート (配合: 1、2)

保存条件による差が小さいものの、 $W/B = 40\%$ の場合若干認められる。

$W/C = 40\%$ は電流量が大きく塩化物イオンの透過性が高いといえる。試験結果より混和材を添加したコンクリートに比べ塩化物イオンの透過に対する抵抗性は低いと考えられる。

(b) エトリンサイト生成系高強度混和材 (配合: 3、4、5、6)

塩化物イオン浸透深さでは他の混和材と大きな差が認められなかったが、急速塩素透過性試験では電流量が小さいうえに混和材料の増加に伴い電流量の低下も認められるとともに、海水保存と真水保存に大差が認められない。従って、エトリンサイト生成系高強度混和材は海水に曝されるコンクリートの、塩化物イオンの透過に対する抵抗性を高めるために有用と思われる。AASHTO基準よりラテックス混入コンクリート同等と判定される。

(c) シリカフェーム (配合: 7、8)

全配合中で最も電流量が小さく良好である。3.1および3.2に示したように強度は大きく塩化物イオン浸透深さは小さい。AASHTO基準よりラテックス混入コンクリート同等と判定される。

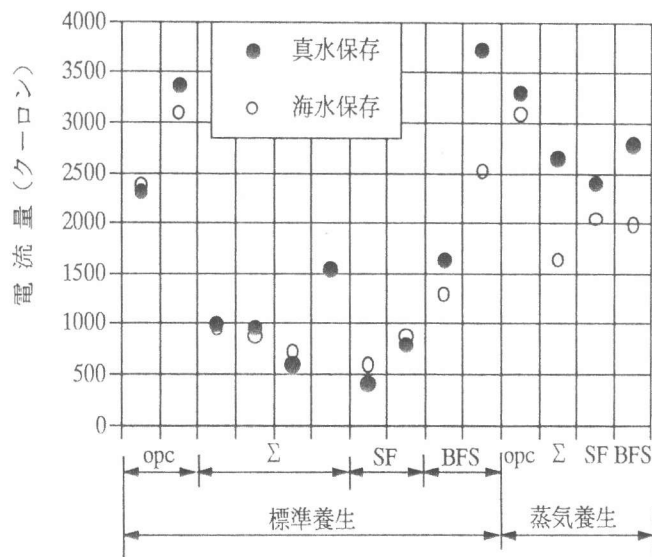


図-7 急速塩素透過性試験による各種混和材の評価

(d) 高炉スラグ微粉末 (配合: 9、10)

一般的に耐久性が良いとされているが急速塩素透過性試験結果は、標準コンクリートとエトリンガイト生成系高強度混和材の中間程度である。塩化物イオン浸透深さ試験結果とは傾向が異なり、その原因については不明である。

(e) 蒸気養生について (配合: 11~14)

蒸気養生を行った供試体は標準養生に比べ電流量が大きく、水結合材比の違いによる差も大きい。

4. まとめ

各種混和材を添加した高強度コンクリートの塩化物イオン浸透に対する抵抗性を急速塩素透過性試験により評価した本研究の結果は以下の通りである。

(1) セメント量が多く、水結合材比が小さい配合の標準コンクリートは圧縮強度が大きいですが、保存による塩化物イオンの浸透が大きい。

(2) 塩化物イオン浸透深さ試験及び急速塩素透過性試験の結果から、高強度コンクリート用混和材を混入したコンクリートは、塩化物イオンの浸透抵抗性に優れる。

(3) 塩化物イオンの浸透深さを議論するに当たり、急速塩素透過性試験の結果は有用である。

(4) 蒸気養生したコンクリートは塩化物イオンの浸透性に劣る。

(5) 高強度コンクリートに対する急速塩素透過性試験結果は、塩化物イオンの移動と電気抵抗性を評価しているものとみなせた。

(謝辞) 本研究の遂行に当たり、ご助力頂いた金沢大学 鳥居助教授、東京都立大学 大賀助教授、東京工業大学 坂井助教授に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 大即信明・中下兼次・Tiong-Huan WEE・長瀧重義: 硬化したコンクリート中における塩素イオン量の測定に関する研究、セメント・コンクリート論文集、pp. 156-161、No.43、1989
- 2) 鳥居和之・笹谷輝彦・川村満紀: 急速試験法 (AASHOT T-277) によるシリカフェームコンクリートの塩化物イオン透過性の評価、「シリカフェームを用いたコンクリート」に関するシンポジウム講演論文報告集、pp. 61-66、1993
- 3) 大賀宏行、R.D.Hooton: 急速塩化物透過性試験によるセメント硬化体中の塩化物移動現象の評価、生産研究、第46巻、第7号、1994、7