

[1077] 硬化コンクリート中への塩素イオンの浸透性  
に関する 2, 3 の検討

正会員 飛坂基夫 (建材試験センター)  
正会員 〇柳 啓 (建材試験センター)

1. はじめに

近年、鉄筋コンクリート構造物の早期劣化が問題となっており、特に海水中及び海岸に近い場所に建設される鉄筋コンクリート構造物は、海水や海水滴等の影響を受け、コンクリート中に塩素イオンが侵入し、埋め込まれた鉄筋の腐食が著しく促進され、構造物は劣化に至る。

本報告は、このような海水等の影響を受ける鉄筋コンクリート構造物への塩素イオンの浸透性を調べることを目的にコンクリートの水セメント比及び供試体の乾燥、湿潤の差が塩素イオンの浸透性に及ぼす影響について実験的に検討を行ったものである。

2. 実験の概要

本実験は(A)十分に乾燥させた状態の供試体への塩素イオンの浸透性に関するものと(B)十分に吸水させた湿潤状態の供試体への塩素イオンの浸透性に関するものからなる。前者はスランブ約10cmのコンクリートを用いて水セメント比と塩素イオン浸透深さ及び質量増加率、フルオレセインナトリウム変色法による呈色限界と塩素イオン含有量及び供試体表面からの深さと塩素イオン含有量の関係を検討するものであり、後者は、スランブ約10cm及びこれを約21cmに流動化した2種類のコンクリートを用いて、水セメント比と塩素イオン浸透深さ及び質量増加率の関係を検討するものである。また、実験(A)及び(B)から供試体の乾燥、湿潤による塩素イオン浸透性の違いを比較検討するものである。これらの実験における要因及び水準を表-1に示す。

表-1 実験計画

要 因	水 準	
	実 験 (A)	実 験 (B)
水セメント比 (%)	25,30,35,40,45 50,55	25,35,45,55
目標スランブ (cm)	10	10, 21 (流動化)
供試体の状態	乾燥	湿潤
測定項目	塩素イオンの浸透深さ 質量増加率 塩素イオン含有量	塩素イオンの浸透深さ 質量増加率

2.1 使用材料及びコンクリートの調合

セメントは早強ポルトランドセメントを使用した。骨材は細骨材として川砂(富士川産)を、また、粗骨材として碎石2005(硬質砂岩)を使用した。混和剤として高性能減水剤( $\beta$ -ナフタリンスルホン酸塩高縮合物)を使用した。コンクリートの調合は、単位粗骨材量及び細骨材率を一定としたNon AEコンクリートとした。コンクリートの調合をまとめて表-2に示す。

2.2 供試体

実験(A)では、10×10×40cmのコンクリートを3年間、温度20℃、湿度60%RHの恒温恒湿室中に保存したのち、ダイヤモンドカッターで10×10×10cmの寸法に切断し、1ヶ月間、温度20℃、湿度60%RHの恒温恒湿室に静置し乾燥したものを供試体とした。実験(B)では、スランブ約10cm及びこれに高性能減水剤を後添加(ベースコンクリート練り上り後5分)し、スランブ約21cmに流動化したコンクリートについて材令4週まで標準水中養生を行い、これを前者と同様、10×10×10cmに切断したものを供試体とした。同一水準に対する供試体数は実験(A)では3個、実験(B)では4個とした。

表-2 コンクリートの調合

目録	セメント比		スランパ		配合率				絶対容積配合 $l/m^3$			乾燥量 $kg/l$	空気量 %		高性能減水剤 添加量 (%)		
	スランパ	%	c m	%	W	C	S	G	C	S	G		kg/l	重量法	圧力法	同時	後添加
乾燥	25	8.5	42.9	127	504	787	1047	161	297	395	2.465	2.0	2.1	3.3	-		
	30	12.7	43.0	140	464	791	1048	148	298	395	2.443	1.9	2.3	2.1	-		
	35	13.2	42.9	152	434	791	1049	138	298	396	2.425	1.6	2.0	1.6	-		
	40	10.2	42.9	161	405	788	1046	129	297	395	2.400	1.8	2.1	1.3	-		
	45	9.3	43.0	171	379	794	1053	121	300	397	2.397	1.1	1.7	0.9	-		
	50	10.0	43.0	177	357	792	1051	114	299	397	2.377	1.3	1.6	0.6	-		
浸漬	25	8.8	43.2	128	507	799	1050	161	300	398	2.484	1.3	2.5	2.9	-		
	35	9.3	43.2	151	429	793	1043	137	298	395	2.416	1.9	2.2	1.6	-		
	45	10.5	43.2	169	375	798	1049	119	300	397	2.391	1.5	1.9	0.9	-		
	55	8.0	43.2	184	338	805	1058	108	303	401	2.385	0.4	1.3	0	-		
	21	25	23.0	43.2	127	507	797	1048	161	300	397	2.479	1.5	1.8	2.8	1.7	
		35	20.6	43.2	154	438	810	1064	139	305	403	2.466	-	1.1	1.8	0.5	
45		21.0	43.2	171	379	804	1058	121	302	401	2.412	0.5	0.9	1.0	0.4		
55		20.0	43.2	184	338	806	1060	108	303	402	2.388	0.3	0.9	0	0.4		

注)セメントに対する重量百分率

### 2.3 塩素イオン浸透深さ及び質量増加率の測定

塩水は3.5%濃度のNaCl水溶液を使用した。供試体は両側面を除く4面をエポキシ樹脂でシールした。塩水への浸漬期間は4週間とした。塩素イオンの浸透深さの測定は、供試体を塩水から取り出し、割裂したのち、先ず最初にその断面に0.1%濃度のフルオレセインナトリウム水溶液を噴霧する。次に、その上から2%濃度の硝酸銀水溶液を噴霧し、この時の呈色反応によって塩素イオンの浸透を判別した(フルオレセインナトリウム変色法)。塩素イオン浸透深さは供試体の2側面で各5点ずつ測定した合計10点の平均値として求めた。また、質量増加率は、塩水浸漬前後の供試体の質量差から求めた。

### 2.4 塩素イオン含有量の測定

塩素イオン浸透深さを測定した後の供試体の表面から1cmずつスライスし、これを乾燥し、0.15mm以下に微粉碎したものを試料とした。また、塩素イオンの抽出は硝酸溶解法により行い、吸光度法により、塩素イオン含有量を測定した。

## 3. 実験結果及び考察

### 3.1 水セメント比と塩素イオン浸透深さ及び質量増加率の関係

図-1に示すように、塩素イオンの浸透深さは水セメント比が小さくなるに従って小さくなる傾向が認められる。特に、乾燥状態の供試体を塩水に浸漬した場合にはその傾向が顕著で、塩素イオン浸透深さY(mm)と水セメント比W/C(%)の関係は $Y=1.00W/C-28$ ( $r=0.9522$ )で表わされる。また、質量増加率についても同様の傾向が認められ、水セメント比の小さいコンクリートは塩素イオンの浸透が小さくかつ質量増加率も小さいことが確認できた。十分に吸水させた供試体の場合でも、塩素イオンの浸透深さは水セメント比の影響が大きく、その関係は $Y=0.24W/C-5$ ( $r=0.9952$ )で表わされる。

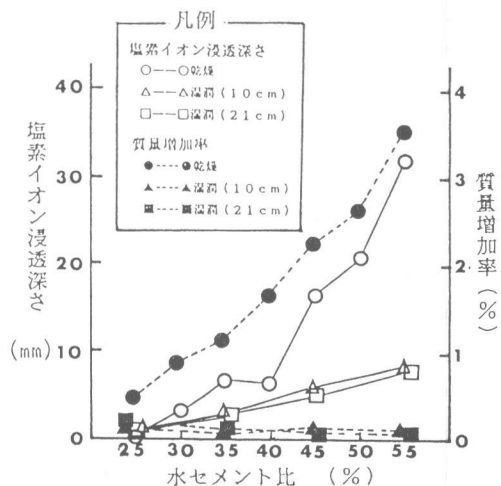


図-1 水セメント比と塩素イオン浸透深さ及び質量増加率の関係

これらのことは、水セメント比45%と55%のコンクリートについて実施した嵩等の報告〔1〕と同様な傾向を示しているが、水セメント比を更に小さくすると塩素イオンの浸透が非常に小さくなることを示している。しかし、湿潤供試体の質量増加率については、ほぼ一定で水セメント比による差は認められない。また、スランパの違いによる塩素イオンの浸透性及び質量増加率は特に差が認められない。

### 3.2 質量増加率と塩素イオン浸透深さの関係

乾燥供試体の質量増加率X(%)と塩素イオン浸透深さY(mm)の関係は図-2に示すように $Y=10X-7$ ( $r=0.9813$ )で表わされる。しかしながら、湿潤供試体の場合には、両者の間に相関関係は認められない。このことは、供試体の乾燥状態により、コンクリート中への塩素イオン浸透性に差異があることを示している。

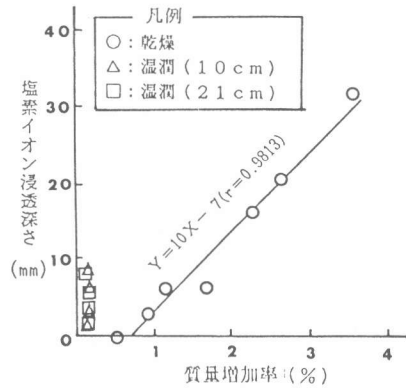


図-2 質量増加率と塩素イオン浸透深さの関係

### 3.3 フルオレセインナトリウム変色

法による呈色限界と塩素イオン含有量の関係

塩素イオンの浸透が認められた部分を含む位置と塩素イオンの浸透が認められなかった位置における塩素イオン含有量の関係は、図-3に示すように或る一定の傾向を示してはいるが、本実験の範囲ではデータ数が少なく、明確にすることは出来なかった。

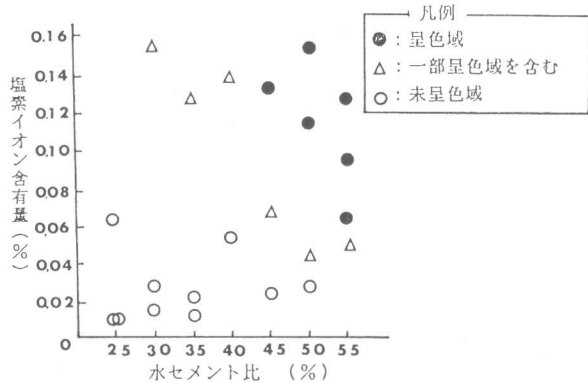


図-3 呈色域と塩素イオン含有量の関係

### 3.4 供試体表面からの深さと塩素イオン含有量の関係

乾燥供試体を用いて行った塩素イオン含有量測定結果を図-4に示す。塩素イオン含有量は供試体表面部分で多く、内部にいく程小さくなる傾向が認められる。表面部分で0.06~0.15%、中心部で0.01~0.05%である。W/C=25%のコンクリートでは、表面から1cmの位置において、0.06%程度の塩素イオンが認められたが表面から1cm以上離れた位置での塩素イオン含有量に差は認められない。従ってW/C=25%のコンクリートでは、表面部分にのみ塩素イオンが浸透していたものと考えられる。

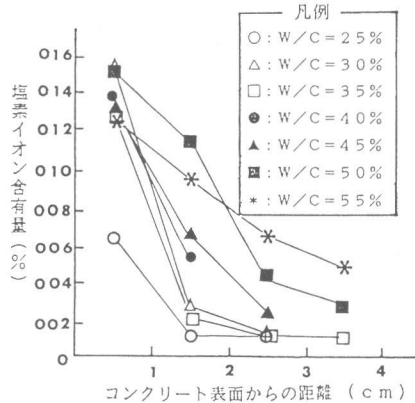


図-4 コンクリート表面からの距離と塩素イオン含有量の関係

### 3.5 塩素イオンの浸透性に及ぼす供試体の乾燥、湿潤の影響

図-1及び図-2に示したように、乾燥状態の供試体と湿潤状態の供試体では、塩素イオンの浸透性が明らかに異なる。W/C=25~40%までは供試体の乾燥、湿潤による差はほとんどないが、W/C=45%以上になると乾燥供試体への塩素イオンの浸透が大となりW/C=55%では、湿潤状態の供試体の3倍以上の浸透深さとなる。また、乾燥状態の供試体の質量増加率は水セメント比に比例して大となるが、湿潤状態の供試体ではその値がほぼ一定であり、供試体の乾燥・湿潤によりコンクリート中への塩分浸透が異なることが認められる。越川等〔2〕は、湿潤状態の場合のコンクリート中への塩分の浸透は濃度拡散による流れによって塩分が浸透すること、また、乾燥状態の場合にはこれに毛管流れが加わることによって塩素イオン浸透性が大きくなると指摘しており、本実験(W/C=45~55%のコンクリート)の結果においてもこれらのことが推察される。

### 3.6 見掛けの拡散係数

一般に塩素イオンの浸透速度は、Fickの法則に従うとされており、(1)式中の $D_c$ (拡散係数)で表わされている。

$$C = C_0 \left[ 1 - \operatorname{erf} \frac{X}{2\sqrt{D_c \cdot t}} \right] \dots (1)$$

ここに、 $X$  : 表面からの距離

$C$  :  $X$ での塩素イオン含有量 (%)

$C_0$  :  $X=0$ での塩素イオン含有量 (%)

$t$  : 経過時間 (sec)

$D_c$  : 塩素イオンの拡散係数 ( $\text{cm}^2/\text{sec}$ )

そこで式(1)を用いて、 $C_0$ としてコンクリート表面から0.5cmの位置の塩素イオン含有量を用いて計算した見掛けの拡散係数を図-5に示す。これによると、見掛けの拡散係数は一般に言われている拡散係数( $0.5 \sim 1.0 \times 10^{-8} \text{cm}^2/\text{sec}$ )より大きな値となっているが、これは供試体が乾燥していること、及び塩水への浸漬期間が短いことが影響しているものと考えられる。また、見掛けの拡散係数は水セメント比が小さくなるに従って小さくなる傾向が認められた。

### 4. まとめ

本実験の範囲で以下のことが明らかになった。

①水セメント比と塩素イオン浸透深さの間には明確な関係が認められた。②塩素イオン浸透深さと質量増加率との関係は乾燥供試体の場合は明らかに相関性があるが、湿潤供試体の場合は特に認められなかった。③フルオレセインナトリウム変色法による呈色域と塩素イオン含有量との関係は、本実験の範囲では明確にできなかった。④供試体の乾燥・湿潤による塩素イオン浸透性の差はW/C=45%以上で、大きくなる傾向が認められた。

### 参考文献

〔1〕 嶋 英雄, 和泉意図志, 野村昭一: コンクリート中への塩分浸透量に及ぼす水セメント比及びセメントの種類の影響, 日本建築学会大会 昭和61, PP249~PP245

〔2〕 越川茂雄, 佐藤次郎, 梅谷純生: コンクリートの塩分浸透速度に関する一考察, セメント技術年報 40, 昭和61, PP91~PP94

本実験のデータの取りまとめにあたり、建設省建築研究所 梶田主任研究員にご指導いただいた。ここに謝意を表します。

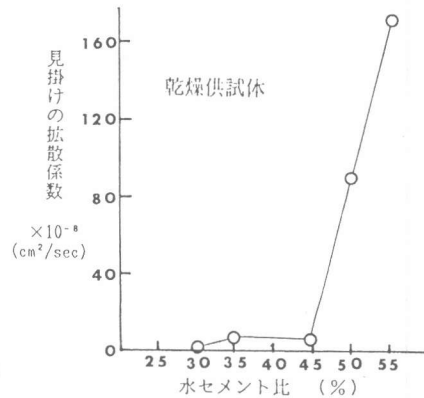


図-5 水セメント比と見掛けの拡散係数の関係