

論文 コンクリートの塩分浸透に及ぼす塩水浸漬開始材齢の影響

野田 一弘*1・河野 広隆*2・田中 良樹*3

要旨：浸漬開始材齢がコンクリートの塩分浸透性に及ぼす影響を把握することを目的に、材齢3日まで湿潤養生、その後塩水浸漬までの間、気中養生し、浸漬開始材齢を3日～28日まで変化させた、W/Cが25～55%のコンクリートについて塩水浸漬試験を実施した。また、浸漬開始時の供試体の緻密さや含水状態を把握するため、比導電率ならびに含水分布を測定した。その結果、W/Cが40%および55%では浸漬開始材齢が28日までの範囲では、開始材齢が長いほど塩化物イオンのみかけの拡散係数が大きくなることを確認した。

キーワード：塩害、塩化物イオン、塩水浸漬開始材齢、拡散係数、比導電率、含水率

1. はじめに

塩害地域では、台風や日本海沿岸の季節風などによって塩分環境が季節により大きく異なり、施工時期によっては、コンクリートの脱型直後から過酷な塩分環境下に曝される場合がある。コンクリートの脱型時期あるいはプレキャスト部材の搬入時期が、その後の塩分浸透性に影響を及ぼす可能性が考えられる。

実環境下での暴露とやや条件は異なるが、海水への浸漬開始材齢を4～72時間まで変化させたモルタルの浸漬試験によると、開始材齢が塩分浸透性に及ぼす影響は認められなかった¹⁾。しかし、気中における乾燥の影響は不明確であることなど、上記の影響は、まだ必ずしも十分に明らかにされたとはいえない。

これらの点を把握するための基礎的な検討として、室内での気中養生の後、浸漬開始材齢を3、7および28日と変化させて、3ヶ月間の塩水浸漬試験を行った。対象としたコンクリートの水セメント比(以下W/C)は、25～55%とした。また、浸漬直前におけるコンクリートの緻密さや含水状態を把握するために、比導電率ならびに含水分布を測定した。

2. 試験方法

2.1 塩水浸漬試験

表-1にコンクリートの配合を、表-2にその基本性状を示す。コンクリートの練混ぜは、2軸の強制練りミキサで行った。供試体はφ10cm×20cmの円柱体である。打設後、2日目に脱型、3日目までは湿潤状態を保持した後、塩化物イオンの浸透を一方向とするため、また、気中養生時の乾燥を塩分の浸透面のみとするため、円柱の側面および打込み上面にエポキシ樹脂を塗布した。その後、所定の浸漬開始材齢まで屋内の気中に放置(気中養生)した。

気中養生後、所定の浸漬開始材齢に達した供試体から順次、NaCl 5%の塩水に浸漬した。浸漬開始材齢は、3、7および28日とした。塩水浸漬後3ヶ月目(91日目)において、浸透面から深さ方向に1cmごとの全塩化物イオン量をJCI-SC4に基づき測定した(図-1)。

2.2 含水分布の測定

材齢7日、28日の浸漬開始時にコンクリートの含水分布を測定した。供試体は、塩水浸漬試験用の供試体を作成したコンクリートと同一のバッチから作成したφ10×20cmの円柱体とした。3日間の湿潤養生の後、あらかじめ乾燥面

*1 独立行政法人土木研究所 構造物マネジメント技術チーム 交流研究員 工修 (正会員)
 *2 独立行政法人土木研究所 構造物マネジメント技術チーム 主席研究員 工修 (正会員)
 *3 独立行政法人土木研究所 構造物マネジメント技術チーム 研究員 (正会員)

表-1 配合条件

記号	W/C (%)	s/a (%)	Air (%)	W (kg/m ³)	C (kg/m ³)	S (kg/m ³)	G (kg/m ³)	SP (%)	AE (%)	ペースト量 (L/m ³)
C 25	25	40.0	4.5	137	546	673	1,029	2.5	0.040	0.355
C 30	30	40.0	4.5	151	502	673	1,029	1.8	0.016	0.355
C 40	40	40.0	4.5	173	432	673	1,029	0.8	0.006	0.355
C 55	55	40.0	4.5	173	315	713	1,088	0.0	0.008	0.318

混和剤：高性能AE減水剤 (SP)、空気量調整剤 (AE) 混和剤使用量は、セメント質量に対する割合を示す
 細骨材：大井川産川砂、密度2.61g/cm³、FM=2.87 粗骨材：笠間産碎石s2005、密度2.66g/cm³
 セメント：早強ポルトランドセメント

から深さ方向に約1cmごとに5cm程度まで切断し、元の形状に戻して乾燥面（打込み底面）以外をアルミテープで覆った（図-1）。所定の試験開始材齢に達した後、各スライスの質量 W_i を測定した。その後、105℃で質量が一定値となるまで炉乾燥を行い、絶乾状態にしたスライスの質量 W_d を測定した。含水率は、(1)式により算出した。

$$\text{含水率(\%)} = \left(\frac{W_i - W_d}{W_d} \right) \times 100 \quad (1)$$

また、浸漬開始直前の自然状態での測定の後、すぐに急速塩分浸透試験の前処理で行われる真空飽水処理（ここでは処理前に一度、炉乾燥により絶乾状態とした）により飽水状態とした場合についても、含水分布の測定を行った。

2.3 比導電率の測定

浸漬開始時にコンクリートの比導電率も測定した。コンクリートの比導電率は、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、コンクリートの緻密さを示す指標のひとつとなる²⁾。比導電率の測定に用いた供試体は、塩化物イオンの測定に用いた供試体の残りの部分（表層から10~15cmの範囲）から切り出した、約5cmの幅の円柱体、および含水分布の測定に用いた約1cm幅のものである。比導電率の測定方法を図-2に示す。測定の際の電圧は1.0V、周波数は1.0kHzとした。比導電率は、(2)式により算定し、測定時の温度の影響を考慮して20℃相当の値に換算した。

表-2 練混ぜ結果および圧縮強度試験結果

記号	スランブ (cm)	スランブフロー (cm)	空気量 (%)	練上温度 (℃)	標準養生供試体 28日圧縮強度 (N/mm ²)
C 25	20.4	---	4.3	24.4	92.0
C 30	---	61×62	5.0	22.9	75.1
C 40	21.2	37×38	5.1	21.7	52.9
C 55	11.0	---	4.1	21.3	40.4

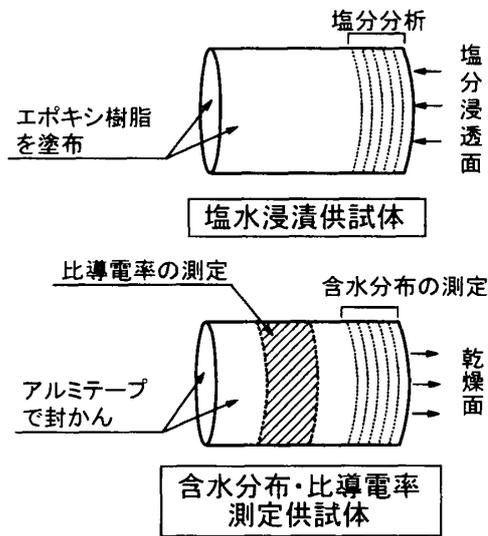
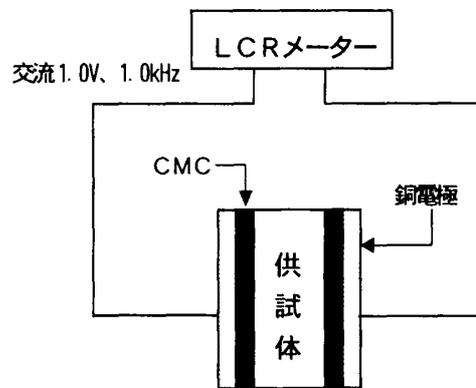


図-1 供試体概要



CMC：カルボキシ・メチル・セルロースを5%の塩水と混ぜたもの

図-2 比導電率の測定方法

$$\kappa = L / RA \quad (2)$$

ここに、 κ : 比導電率 ($1/(\Omega \cdot \text{cm})$)

R : 抵抗値 (Ω)

L : 供試体の長さ (cm)

A : 供試体の断面積 (cm^2)

比導電率の測定は、自然状態および飽水状態について行った。

3. 塩化物イオン浸透性状

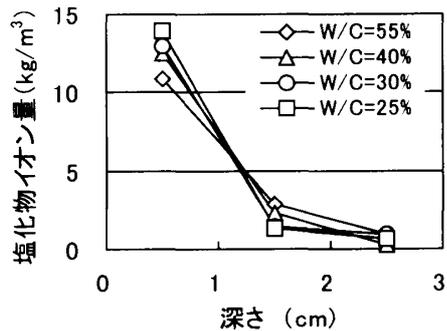
図-3に浸漬開始材齢ごとのコンクリート中の塩化物イオンの分布をW/Cごとに示す。浸漬開始材齢による塩化物イオンの分布の相違は、W/Cが大きいほど顕著に現れており、開始材齢28日の方が、同3日の場合より浸透が速かった。W/Cが40%および55%の場合、塩化物イオンの分布は、塩水浸漬期間が同じであっても浸漬開始材齢によって大きく異なった。深さ1~2cmのところの塩化物イオン量をみると、浸漬開始材齢が長いほど、塩化物イオン量が多くなっていた。W/Cが25%および30%の場合、塩化物イオンの分布は、浸漬開始材齢がいずれの場合においても顕著な変化が見られなかった。表層から1cmよりも深い範囲は、浸漬3ヶ月では外部からの塩化物イオンの浸透が、ほとんどなかったと判断できる。

これらの塩化物イオン分布に基づく拡散係数(以下 D_c)とW/Cの関係を図-4に示す。ここで D_c は、塩化物イオンの浸透がフィックの拡散方程式に従うものと捉え、一次元の拡散方程式で境界条件を C_0 一定としたときの解である(3)式にあてはめて算出した。あてはめは、文献3)に示した留意点を考慮した上で行った。

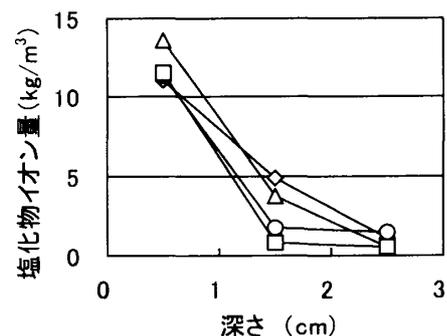
$$C(x,t) = C_0 \left(1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{D_c \cdot t}} \right) \quad (3)$$

ここに、

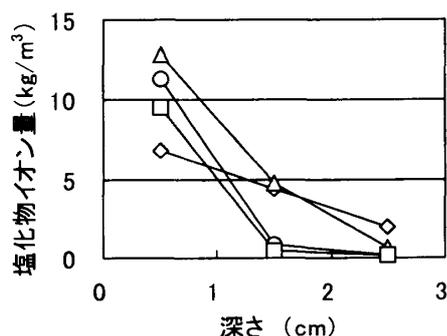
$C(x,t)$: 表面からの距離 x , 浸漬時間 t における塩化物イオン量



(a) 浸漬開始材齢 3 日



(b) 浸漬開始材齢 7 日



(c) 浸漬開始材齢 28 日

図-3 塩化物イオンの浸透分布 (3ヶ月塩水浸漬試験結果)

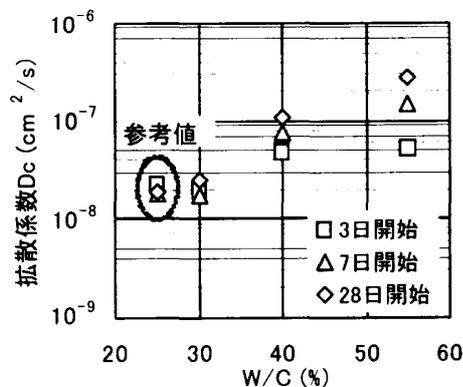


図-4 D_c とW/Cの関係 (3ヶ月塩水浸漬試験結果)

erf () : 誤差関数

Co : コンクリート表面の塩化物イオン量

W/C が低い場合など、塩化物イオンの浸透深さが 1cm に満たないような場合には、適切なあてはめができないことから、今回の W/C が 25% の結果は、参考値として示した。

浸漬開始材齢によらず、W/C が大きいほど Dc も大きくなる傾向が認められた。また、浸漬開始材齢が 3 日～28 日の範囲において、W/C 40% および 55% では、浸漬開始材齢が遅いほど Dc は大きくなる傾向が認められた。W/C 30% と低い場合には、浸漬開始材齢の顕著な影響が認められなかった。

4. 塩水浸漬開始時の含水率および比導電率

4.1 含水分布

図-5 に各供試体の表層付近の含水分布を、自然状態および飽水状態のそれぞれについて示す。W/C が 55% では、浸漬までの材齢が長くなるほど表面付近で含水率の低下が大きく、気中養生期間が長くなるほど、より深い位置まで乾燥が進行していた。一方、W/C が 25～40% では開始材齢による差は、ほとんど認められなかった。なお、W/C が 25% および 30% の結果では、飽水状態の方が自然状態の場合よりも大きくなっていった。これは、真空飽水処理により空隙部にまで水が浸透したためと推測され、含水分布の形状から気中に曝すことによる乾燥の影響は、ほとんどなかったと考えられる。

4.2 自然状態での比導電率

図-6 に表層部の比導電率（深さ 0～2cm の平均）と W/C の関係を材齢ごとに示す。材齢に関わらず、W/C が小さいほど比導電率も小さかった。また、材齢が長くなるほど比導電率は小さくなる傾向が認められた。これは、水和に伴う細孔構造の変化と、気中養生期間の増加に伴う乾燥の影響と考えられる。

同様に、図-7 に深さ 10～15cm の範囲における比導電率の測定結果を示す。図-6 と同様に材齢に関わらず W/C が小さいほど比導電率も小さくなるが、いずれの材齢も図-6 の比導電率より大きかった。図-5 に示した含水分布から、深さ 10～15cm の範囲においては、乾燥の程度が極めて少なかったと考えられる。この点から、図-7 の材齢に伴う変化は水和に伴うものであり、図-6 との差は、表層部の乾燥の影響によるものと考えられる。

4.3 飽水状態での比導電率

浸漬開始直前の供試体表層部の緻密さを把握するため、真空飽水処理により飽水状態とした

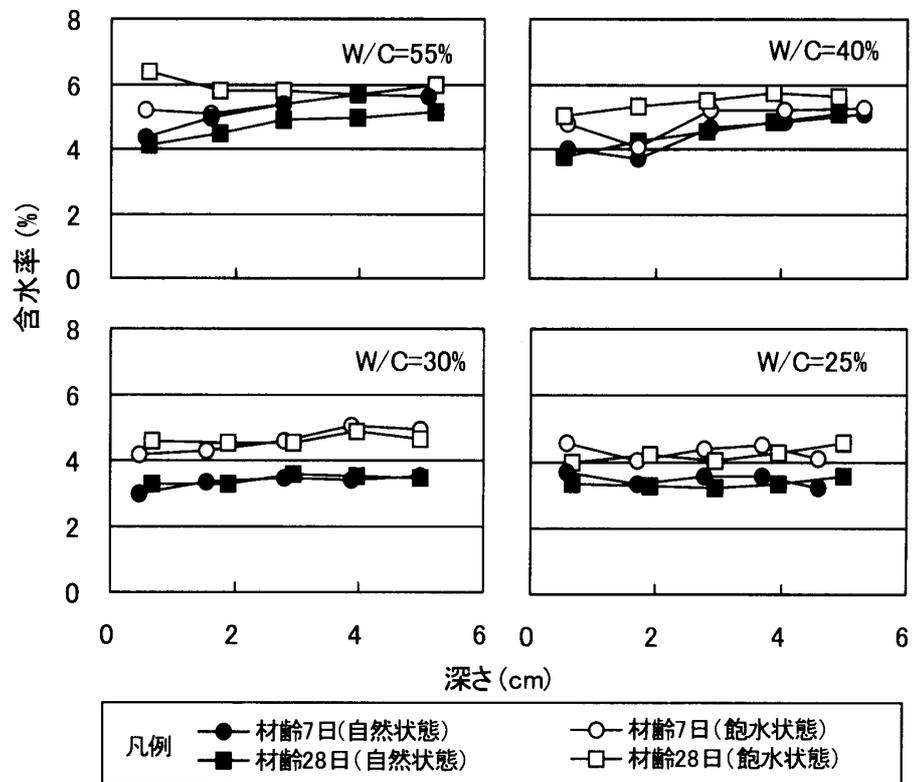


図-5 含水分布

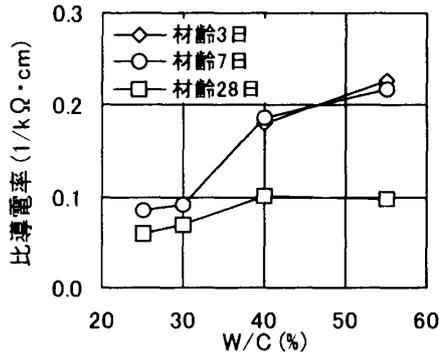


図-6 比導電率とW/Cの関係
(深さ0~2cm 自然状態)

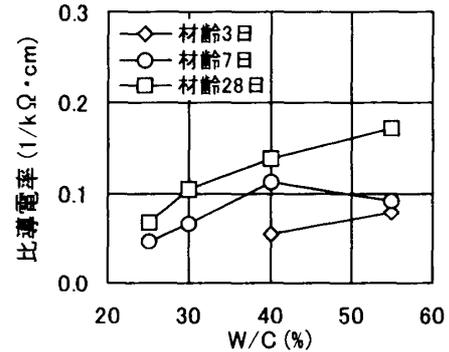


図-8 比導電率とW/Cの関係
(深さ0~2cm 飽水状態)

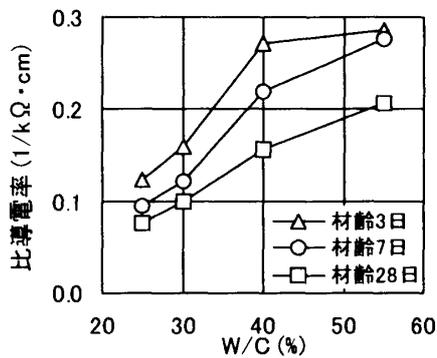


図-7 比導電率とW/Cの関係
(深さ10~15cm 自然状態)

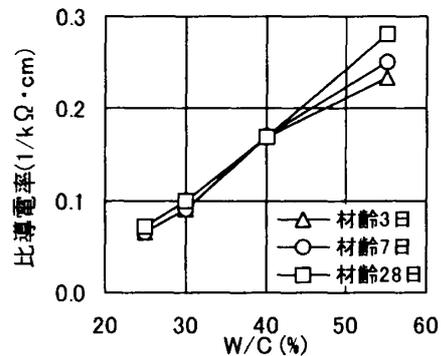


図-9 比導電率とW/Cの関係
(深さ10~15cm 飽水状態)

ときの比導電率を測定した。図-8に、供試体表面層部2cmの範囲における飽水状態での比導電率(平均値)とW/Cの関係を浸漬開始材齢ごとに示す。自然状態の結果(図-6)と異なり、浸漬までの材齢が長いほど比導電率が大きい傾向が見られた。同様に図-9に表面から10~15cmの箇所の飽水状態での比導電率測定結果を示す。この箇所では、材齢が比導電率に及ぼす影響はほとんど見られなかったが、W/Cが55%の場合にわずかに、表面層部と同様の材齢による違いが確認された。

また、比導電率は飽水状態にすると、暴露開始材齢が28日の場合は自然状態の結果よりも増加していたが、同3日、7日の場合には逆に自然状態の結果よりも低下していた。この比導電率の変化は、表面層部および内部ともに認められ、表面層部でより顕著であった。図-5に示したように、真空飽水処理によって、供試体内部

の含水率は確実に増加していた。それにもかかわらず、比導電率が減少していた供試体は、炉乾燥によるセメントゲルや鉱物の変質、溶液の濃度変化などが原因と考えられるが、現時点では明確になっていない。しかし、気中養生期間が長く乾燥の度合いが大きいものでは、飽水後の比導電率が増加していたことから、炉乾燥による影響以外に乾燥が細孔構造に何らかの変質を生じさせていた可能性があると考えられる。

5. 暴露開始材齢がDcに及ぼす影響

W/Cが40%および55%の場合で、浸漬までに気中養生したときに暴露開始材齢が長いほど塩化物イオンの拡散係数が大きくなった原因として、まず、気中に放置して表面層部の乾燥が顕著であったことから、乾燥していない場合に比べて、塩水に浸漬する際の吸水とともに塩化物イオンが、速く浸透したことによる影響が上げら

れる。すなわち、 D_c の算定に移流の影響を考慮しなかったため、実際より D_c は大きく評価された部分があると考えられる。これに加えて、4.3 で述べたように乾燥による細孔構造の変質により、再吸水の時点で既に浸漬開始材齢が28日の方が同3日、7日の場合よりも塩化物イオンの浸透を早める細孔構造が形成されていた可能性がある。W/C が大きい場合に、暴露開始材齢の影響がより顕著にみられたことから、原因が吸水作用および構造の変質のいずれにあるか、あるいは両者の割合がどの程度であるかは明確ではないものの、乾燥後に塩水浸漬する場合、乾燥期間が長いほど塩分浸透が速くなる傾向があることがわかった。一方、W/C が25~30%のコンクリートの場合、表層部においても乾燥しにくいことから、乾燥による塩分浸透性への影響は比較的小さいことがわかった。

6. 塩分浸透に及ぼす乾燥の影響と構造物の塩分環境

今回の実験条件は、海岸線付近の構造物で、季節や天候によっては直接波がかかるような環境における構造物や、海中に沈められるプレキャスト部材の環境で実際に見られるものである。このような環境条件の場合、W/Cの低減による塩分浸透抵抗性の向上の程度は、細孔空隙を小さくすることによりコンクリートがもつ本来の塩化物イオンの拡散係数を低減するだけでなく、乾燥の程度を抑制することによる塩化物イオンの浸透抑制の効果もあることがわかった。ただし、大気中で直接波がかかることはないが、飛来塩分などによって構造物周辺の大気中の塩化物が相当に多い場合は、適切な養生の後、表層部がある程度乾燥していた方が、塩分浸透の主たる媒体となる水分が少ないためにむしろ塩化物の浸透を抑制する場合もある³⁾。塩分浸透に及ぼす乾燥の影響はすべてが明確になったわけではないが、少なくとも、構造物の置かれる環境によって、表層部の乾燥が塩分浸透を抑制する場合と逆に促進する場合があることが明らか

となった。基準類の作成にあたっては、これらの点をさらに明確にした上で、対象とする構造物の塩分環境および湿潤環境に応じて、適切な D_c を設定する必要がある。

7. まとめ

- (1) 浸漬開始材齢3~28日の範囲では、W/Cが40%および55%の場合、塩分浸透抵抗性を表す指標である拡散係数 D_c は、浸漬開始材齢が長いほど大きくなった。この原因として、W/Cが大きいほど乾燥の度合いが大きく、塩水浸漬時の吸水が大きくなったことと、乾燥によってコンクリート中の細孔構造に何らかの変質が生じていたことが考えられるが、両者の影響の程度は明確ではない。
- (2) W/Cが30%以下のコンクリートでは乾燥しにくく、開始材齢が塩分浸透性状に及ぼす影響は、認められなかった。今回の試験条件の下では、W/Cが低いコンクリートでは、組織の緻密化に加え、乾燥しにくいことによる塩分浸透抑制の効果もあると考えられる。
- (3) 既往の結果と併せて考えると、コンクリート構造物の置かれる環境によって、コンクリートの乾燥が塩化物の浸透を抑制する場合と促進する場合があることがわかった。

参考文献

- 1) 笠井芳夫，柴田修身：早期に海水に接するモルタル・コンクリートの塩分浸透性状に関する実験，セメント技術年報，51，pp. 274-277，1971
- 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，土木学会年講概要集，V，pp. 535-533，2000
- 3) 田中良樹，藤田学，河野広隆，渡辺博志：高強度コンクリートの塩分浸透抵抗性，コンクリート工学年次論文集，23-2，pp. 517-522，2001