

論文 コンクリートの中性化領域における塩分浸透に関する実験的検討

田中 良樹*1・木村 嘉富*2・村越 潤*3・本間 英貴*4

要旨：既設橋から撤去された、中性化深さ約 45mm のコンクリート床版を用いて、沖縄沿岸部で 3 年間の屋外暴露試験及び 1 年間の塩水浸漬試験を行った。暴露試験、塩水浸漬試験ともに、45mm の厚い中性化領域であっても、塩化物イオンが外部からコンクリート中に浸透して、中性化境界付近の非中性化領域で濃縮し、さらに深い方へ拡散することを確認した。中性化領域の塩化物イオン濃度は深さ方向の変化が小さく、現時点では中性化領域の塩化物イオンの移動が非中性化領域の拡散現象と同じであるか、必ずしも断定できない。本文では、中性化領域の塩化物イオン濃度分布について、フィックの拡散式及び移流拡散式への当てはめを行った結果を示す。

キーワード：塩害、中性化、暴露試験、塩水浸漬試験、塩分浸透、移流拡散

1. はじめに

ほとんど中性化していないコンクリートを塩水に浸漬して、一定の時間経過後にそのコンクリート中の塩化物イオン濃度分布を測定すると、塩水に接していた面からコンクリート内部に向けて塩化物イオン濃度が低下しており、その分布はフィックの拡散式で表わされる。しかし、屋外のコンクリート構造物や暴露供試体の塩化物イオン濃度分布を測定すると、表面付近の中性化した領域の塩化物イオン濃度が非中性化領域のピーク値より低いことが多い¹⁾。

練り混ぜ時に塩化物を混入したモルタルの中性化促進試験の結果より、中性化領域では塩化物イオン濃度が元の濃度よりも低下して、非中性化領域に塩化物イオンが移動することが知られている²⁾。しかし、沿岸部で屋外に曝されているコンクリートの場合、中性化領域の塩化物イオンが、モルタルの中性化促進試験と同様に、中性化していない内部のコンクリートに向かって移動することについて、その濃度分布の形状から明確に判別することが難しい。また、コンクリート表面が中性化した後も、外部から浸入した塩化物イオンがコンクリート内部に浸透するが、中性化領域の通過がどのようになっているか、必ずしも明確でない。

これらを把握するための一つの試みとして、既設橋から撤去された、中性化深さ約 45mm の鉄筋コンクリート床版を用いて、沿岸部での屋外暴露試験を行うとともに、同床版から採取したコンクリートコアの塩水浸漬試験を実施した。本文では、暴露試験 3 年目までの結果と 1 年間行った塩水浸漬試験の結果を報告するとともに、中性化領域の塩化物イオン濃度分布について、フィックの拡散式及び移流拡散式³⁾への当てはめを行った結果を示す。

2. 試験方法

2.1 屋外暴露試験

1972 年に千葉県船橋市内の東京湾沿岸部に建設された非合成鋼板桁橋で、2007 年に鉄筋コンクリート床版の一部が取り換えられた。その際、撤去された床版を入手して、つくば市にある土木研究所の実験棟屋内で約 2 年間保管していた。床版は 2 体あり、1 体は暴露供試体に用い、残り 1 体はつくばの屋内に保管した。

図-1 に、暴露供試体の外観と暴露状況を示す。暴露場所は、沖縄県で建設中の伊良部大橋建設現場のうち、



図-1 暴露状況(北東に向かって撮影)

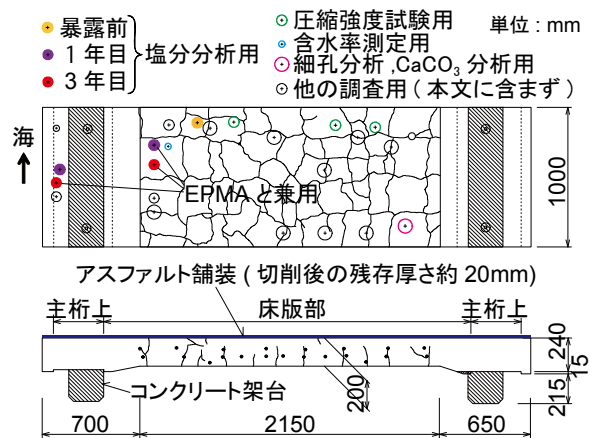


図-2 暴露供試体の形状寸法とコア採取位置

*1 (独)土木研究所 構造物メンテナンス研究センター主任研究員 正会員

*2 (独)土木研究所 構造物メンテナンス研究センター上席研究員 正会員 工修

*3 (独)土木研究所 構造物メンテナンス研究センター上席研究員 博士(工学)

*4 (独)土木研究所 構造物メンテナンス研究センター主任研究員 工修

伊良部島側護岸ブロックの上に設置した。2009年10月から暴露を開始した。また、図-2に暴露供試体の形状寸法と供用中に見られた床版下面のひび割れ状況(透視図)及びコア採取位置を示す。暴露面は床版の下面のみとし、護岸ブロックとの間に270mmの遊間を設けるため、主桁と接していた面に架台を取り付けた。ただし、主桁と接していた面(以下、主桁上)は一部暴露される状態とした。この面は、撤去後、屋内保管中及び暴露試験の間に中性化しているが、主桁上の中性化深さは床版部に比べて小さい。床版の上面はアスファルト舗装の一部(厚さ約20mm)が残存したままとした。また、側面は鉄筋位置を観察した後、防水テープとシリコンで覆った。

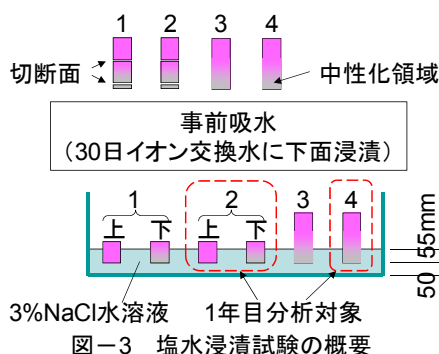
2.2 塩水浸漬試験

屋内保管供試体からφ68mmのコアを採取して、塩水浸漬試験を1年間実施した。図-3に塩水浸漬試験の概要を示す。採取したコアは、側面をエポキシ樹脂系塗料で覆い、下面のみを3%NaCl水溶液に浸した。試験は空調のない屋内で実施した。

中性化していない場合の結果を得るため、一部のコアは深さ100mmのところまで切断した面を塩水に浸した。また、切断面と型枠面では表面の微細構造の違いによる影響があるかもしれないので、切断したコアの残り(中性化領域のあるコア)についても、中性化した表面から10mmを切断して、その切断面を塩水に浸した。

供試体は屋内で約2年間保管されていたことから、コンクリートが乾燥している可能性があると考え、コア側面の塗装後、塩水浸漬前の30日間、イオン交換水に漬けて事前に吸水させた(以下、事前吸水という)。比較のため、事前吸水のない場合についても同様の塩水浸漬試験を行った。

塩水浸漬用コアの中性化深さは削孔時に測定した。中性化深さ測定と塩分分析は、暴露試験と同様に行った。



2.3 測定

(1) 暴露前

暴露試験の直前に、床版の鉄筋やひび割れのない位置でφ68mmのコアを抜き、圧縮強度試験及び中性化深さの測定(1%フェノールフタレインアルコール溶液の噴霧による、以下同じ)を行った。同様に採取したφ68mm

のコアで、暴露試験開始時の塩化物イオン濃度分布(打設時含有塩分及び供用期間中の外来塩分が含まれる)をJIS法(全塩分)により測定した。またφ100mmのコアを用いて、床版下面から0~10, 20~30, 40~50, 60~70mmの各深さにおける空隙率及び全細孔比表面積を水銀圧入法により(細孔直径の測定範囲は3nm~400μm)、CaCO₃含有率を示差熱分析によりそれぞれ測定した。

(2) 暴露後

暴露1年目及び3年目に、床版上面からφ68mmのコアを採取した。9月初旬の伊良部島でのコア削孔は、供試体の表面温度が高く、床版上面のアスファルト混合物の粘性が高くなることや削孔深さ(上面からの貫通削孔)が比較的深いことから、乾式削孔で行うと却って削孔時間が長くなり、他の影響が出ることも懸念されたので、湿式で行うこととした。本文で示すコアは、いずれもひび割れのない部分から採取した。比較のため、主桁上からもコアを採取した。コア採取から分析までの間は、コアの側面と上面をアルミテープで覆った。なお、コア採取した箇所は、その後の暴露試験に影響しないように、無収縮モルタルで補修した。

採取したコアを用いて、塩化物イオン濃度分布の測定と、EPMA分析(深さ80mm×幅68mm、本文では塩化物イオンの面分析結果を示す)を行った。その際にも各コアの中性化深さを測定した。また、暴露3年目に、暴露供試体と屋内に保管している供試体の含水率分布を測定した。含水率分布は、採取したφ45mmのコアを割裂でスライス状にして、割裂直後、真空飽水処理後、105℃での24時間絶乾後、それぞれの時点で各スライスの質量を測定することにより、自然状態での含水率及び飽和含水率を算定した(いずれも絶乾質量に対する率で表す)¹⁾。

表-1 圧縮強度試験結果と床版下面の中性化深さ

供試体	圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 (×10 ³ N/mm ²)	中性化深さ (mm)
屋外暴露	16.9	17.3	45
屋内保管	19.7	14.9	45

注) いずれも3体の平均値、中性化深さは圧縮コアでの測定値

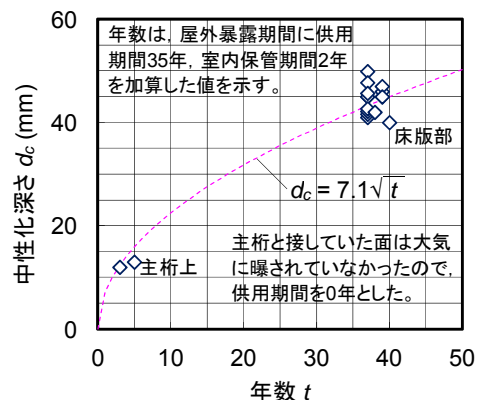


図-4 床版供試体の暴露年数と中性化深さ

表-2 コンクリートの深さ方向の変化

床版下面からの深さ (mm)	中性化の有無	空隙率 (%)	全細孔比表面積 (mm ² /g)	CaCO ₃ 含有率 (%)
0~10	あり	25.3	8.7	37.2
20~30	あり	25.1	7.6	37.8
40~50	一部あり	26.0	33.9	8.2
60~70	なし	26.3	37.4	3.9

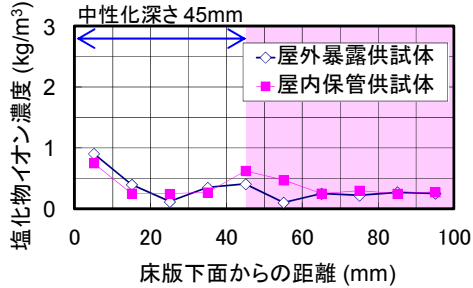


図-5 暴露前の初期塩化物イオン濃度分布

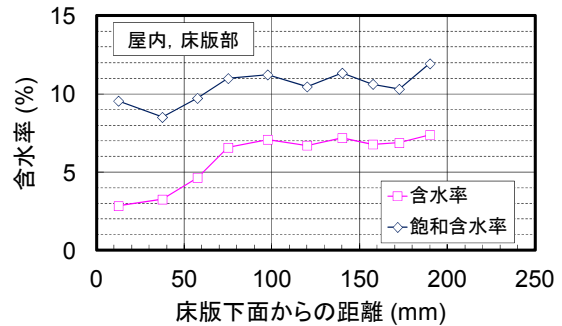
3. 床版コンクリートの調査

表-1 に、コンクリートの圧縮強度、弾性係数及び中性化深さを示す。両供試体ともに、圧縮強度が小さく、圧縮試験用コアの中性化深さはいずれも 45mm であった。測定位置や測定時期によって中性化深さが異なることから、本文に用いるコアの中性化深さを図-4 に示す。主桁上での中性化は床版の撤去後に生じたが、中性化速度は床版部と概ねよく一致した。

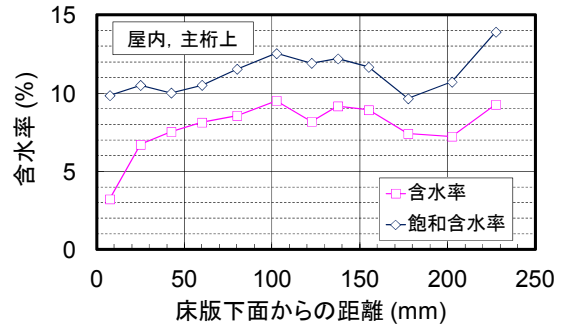
表-2 に、コンクリートの空隙率、全細孔比表面積及び CaCO₃ 含有率を示す。深さ 0~10mm, 20~30mm では、中性化していない部分に比べて CaCO₃ 含有率が高いこと、及び空隙率が小さくなることは、コンクリートの中性化領域で見られる特徴であり⁴⁾、フェノールフタレインによる中性化領域の判定と傾向が一致する。特に中性化の有無による CaCO₃ 含有率の差が顕著であった。また、中性化領域の全細孔比表面積は、非中性化領域に比べて顕著に小さく、測定の対象とした細孔直径の範囲で、硬化セメントペーストが比較的粗い細孔構造に変化していたことを表わすと考えられる。

図-5 に、暴露前の初期塩化物イオン濃度分布を示す。供用中の橋で 1982 年にガーゼ法により 1 年間測定されたときの年平均飛来塩分量は 0.19mdd (mg/100mm²/日, NaCl 換算) であり、沿岸部の塩分環境として厳しくなかったが、供用中における外部からの塩化物イオンの侵入が認められた。中性化領域の境界付近に塩化物イオンの濃縮がわずかに見られた。

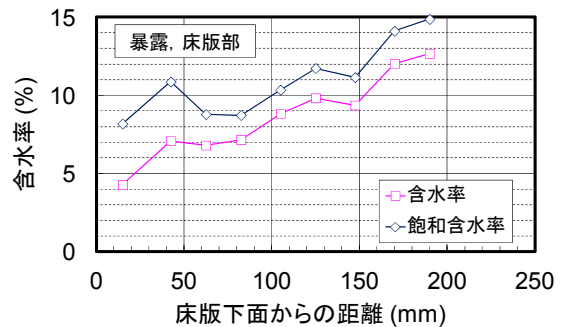
図-6 に、コンクリート中の含水率分布を示す。図中凡例の「含水率」は自然状態での含水状態を表す。また、飽和含水率はコンクリートの空隙率の分布を間接的に表す指標と考えられる。いずれの図においても飽和含水率は 10% を超える部分が多く見られ、コンクリートの密実度が低かった。このことは、低い圧縮強度、著しい中性



(a) 屋内保管供試体の床版部

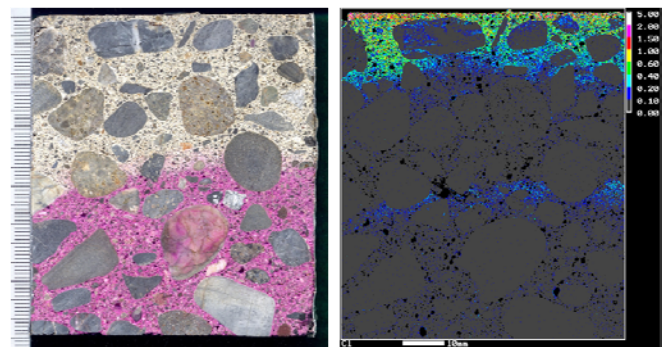


(b) 屋内保管供試体の主桁上



(c) 屋外暴露供試体の床版部

図-6 コンクリート中の含水率分布(暴露 3 年目時点)



中性化深さ 42mm

図-7 暴露 1 年目、床版部の EPMA による塩化物イオン面分析結果 (左は研磨前の中性化深さ測定時の写真)

化深さとともに、コンクリートの品質を表す指標として傾向が一致する。屋内保管供試体のうち主桁上の乾燥は、5 年間屋内に保管されていた間に乾燥したものである。同床版部の乾燥は主桁上の場合よりも、概ね供用中に乾燥した分だけ含水率が低かったと考えられる。

屋内保管供試体の床版部では、中性化領域を超えて

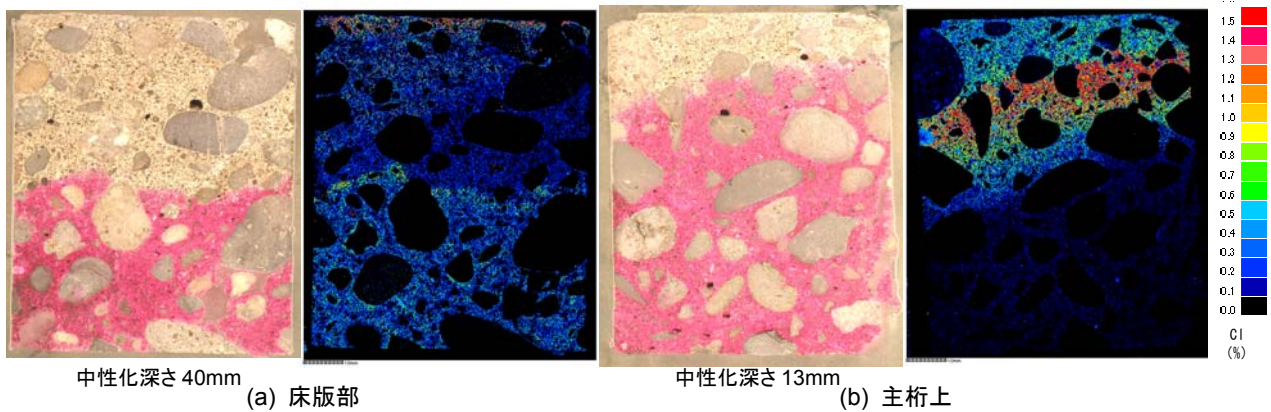


図-8 暴露3年目のEPMAによる塩化物イオン面分析結果（それぞれ左は研磨前の中性化深さ測定時の写真）

深さ60mmまでの含水率が低く、撤去後に中性化した主桁上に比べて、含水率の分布形状に違いが見られ、乾燥の影響が深くに及んでいた。一方、屋外暴露供試体の床版部の含水率は、屋内保管供試体に比べて飽和含水率に対する割合が大きくなっており、暴露後にコンクリート中の水分が増加したと考えられる。

4. 屋外暴露試験の結果

図-7に、暴露1年目の床版部におけるEPMAによるコンクリート中の塩化物イオン分布を、フェノールフタレインによる中性化深さの測定面(EPMAのための研磨前に測定)とともに示す。図の上縁が暴露面である(以下同じ)。中性化深さ42mmのうち、深さ20mm程度まで外部からの塩化物イオンの浸透が見られた。この時点では、非中性化領域での塩化物イオンの濃縮は初期値のままであり、暴露後の塩分浸透は非中性化領域に至らなかった(同コアの初期値を除いた分布は図-9(a)に示す)。

同様に、図-8に暴露3年目の床版部及び主桁上にお

けるEPMA分析結果を示す。また、図-9に、暴露1年目及び3年目の塩化物イオン濃度分布(図-5に示した初期値を除いた値)を示す。これらは、EPMA分析に用いたコアの残り部分を用いて測定した結果を示す。3年目の床版部では、非中性化領域の塩化物イオン濃度が増加しており、深さ40mmの中性化領域であってもその領域を塩化物イオンが通過して非中性化領域まで移動したことがわかる。また、中性化領域でも多量の塩化物イオンを含有していた。EPMAの結果で見られるごく表面付近の塩化物イオンの濃縮を除き、塩化物イオンのピークは非中性化領域で見られた。暴露3年目の結果において、中性化深さが深い床版部の方が主桁上に比べてピーク値が小さいが、中性化深さが深いことから、より深い位置で濃縮が見られた。

図-9の結果のうち、非中性化領域のデータについて、フィックの拡散式に当てはめた結果を併せて示す。これまでの事例¹⁾でも見られるように、非中性化領域における塩化物イオン濃度分布は、同拡散式でよく表されてお

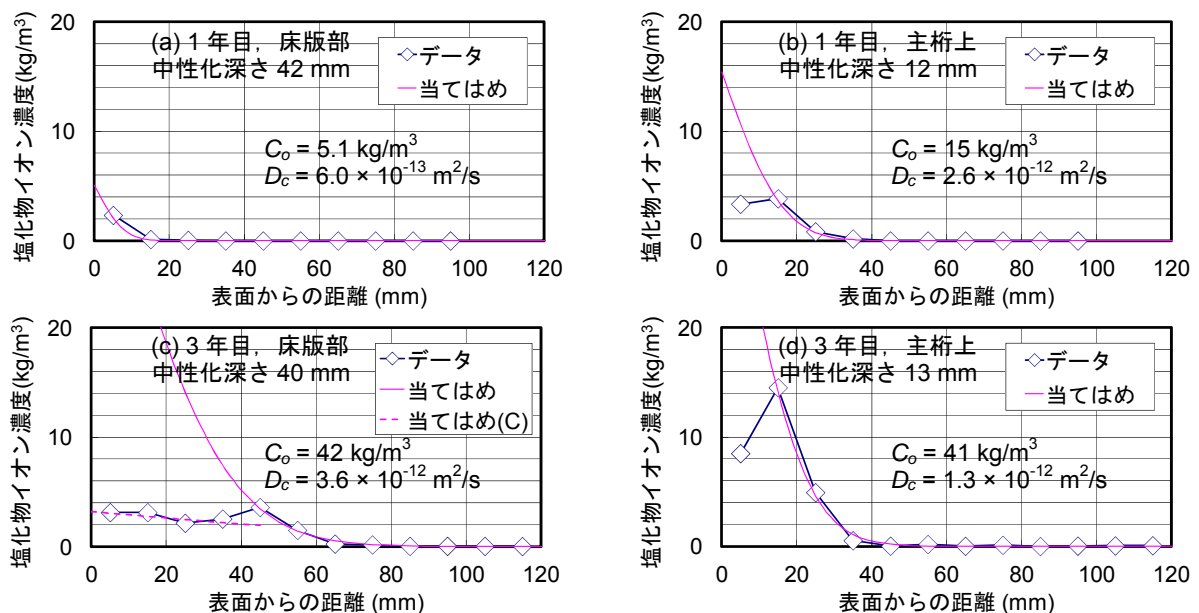


図-9 暴露供試体の塩化物イオン濃度分布

注) 当てはめ(C)は、中性化領域のデータについてフィックの拡散式に当てはめた結果であり、 C_0 、 D_c は表-3に示す。(以下同様)

り、拡散現象に支配されていることが分かる。一方、中性化領域の塩化物イオン濃度は深さ方向の変化が緩慢であり、外部から浸入した塩化物イオンが概ね定期的な非中性化領域に向かって流入しているような分布形状であった。

5. 塩水浸漬試験の結果

5.1 事前吸水の影響

図-10~12に、1年間の塩水浸漬試験におけるコア供試体の塩化物イオン濃度分布(初期値を除く)を示す。表面切断の有無、中性化の有無に関係なく、事前吸水せずに乾燥したまま浸漬すると、事前吸水の場合に比べて深い部分での値が大きく、より深部まで塩化物イオンが浸透する傾向が見られた。

5.2 表面切断の影響

事前給水を行った場合、深さ 10mm の位置で切断したときの結果は、塩水に浸す面が床版下面そのまま(型枠面)の場合と比べて、塩化物イオンの浸透が顕著に速くなる傾向が認められなかった。

5.3 中性化の影響

暴露試験の結果と同様に、a) 非中性化領域の塩化物イオン濃度が増加しており、厚い中性化領域であっても塩化物イオンが通過して非中性化領域に移動すること、b) 中性化した後に浸透した塩化物イオンであっても、中性化の境界における非中性化領域側で塩化物イオンが濃縮すること、すなわち中性化したコンクリートでは、中性化していない場合に比べて深い位置で塩化物イオンの濃縮が見られること、c) 中性化領域の塩化物イオン濃度は中性化の境界付近のピーク値ほどではないものの

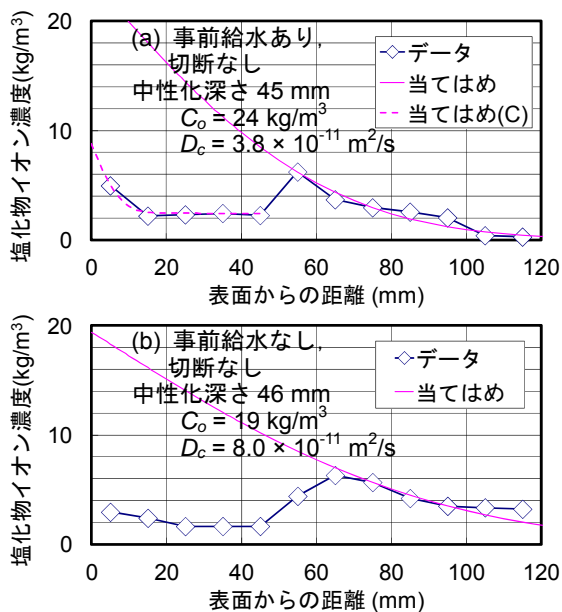


図-10 塩水浸漬試験の塩化物イオン濃度分布 (切断せず、そのまま浸漬したコア供試体)

2~5kg/m³ と比較的高く、かつ深さ方向の変化が非中性化領域に比べて緩慢であることが確認された。

5.4 暴露試験結果との比較

暴露試験では、事前吸水していないが、塩水浸漬で見られたような、奥深くまで塩化物イオンが浸透する傾向は見られなかった。台風時には、波しぶきを直接受ける場合もあり得る暴露環境であるが、これまでのところ、著しく浸水する機会は少なかったと考えられる。

塩水浸漬試験の事前吸水のないコアでは、塩水が主としてその表面張力で深い位置まで早期に浸透したと考えられるが、暴露試験では、暴露前に比べてコンクリート中の水分が高くなっていたにもかかわらず、塩化物イ

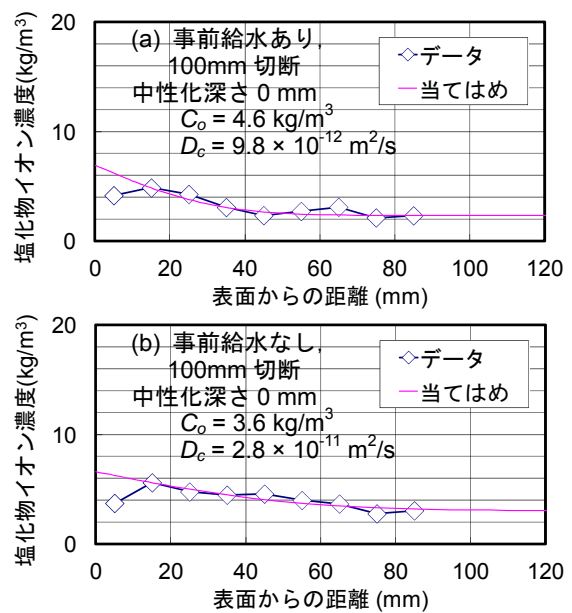


図-11 塩水浸漬試験の塩化物イオン濃度分布 (深さ 100mm で切断、中性化のないコア供試体)

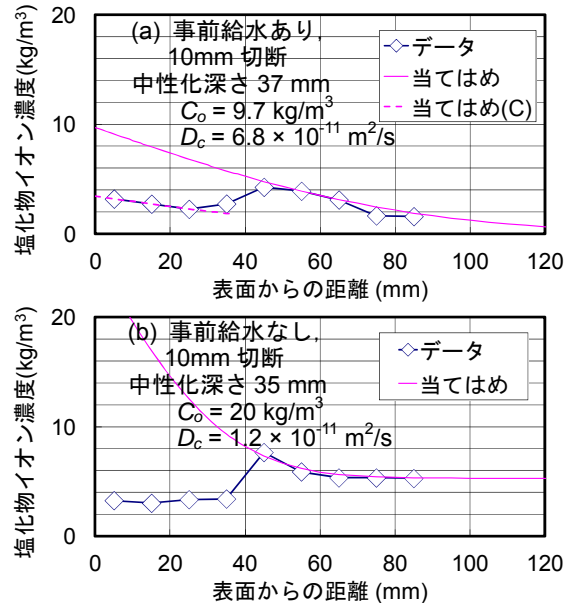


図-12 塩水浸漬試験の塩化物イオン濃度分布 (深さ 10mm で切断したコア供試体)

オンは内部まで浸透していなかった。このことから、暴露試験では、海水の直接的な吸水によって水分が増加したのではなく、主として、大気中の湿度に応じてコンクリート内部の水分が増加したものと考えられる。

6. 中性化領域における塩化物イオンの移動

屋外暴露試験、塩水浸漬試験のいずれにおいても、中性化領域の塩化物イオン濃度の分布は非中性化領域の分布と異なっていた。中性化領域の塩化物イオンの移動が非中性化領域と同じ拡散現象とした場合、拡散係数が顕著に異なると考えられる。中性化領域の塩化物イオン濃度分布について、フィックの拡散式に当てはめた結果を非中性化領域の結果と対比して図-9(c)、10(a)、12(a)及び表-3に示す。 C_o は表面塩化物イオン濃度、 D_c は拡散係数を示す。屋外暴露試験では、中性化領域の拡散係数が非中性化領域に比べて1桁大きかった。逆に、塩水浸漬試験の切断なしの結果では、中性化領域の拡散係数が非中性化領域に比べて2桁小さかった。

表-3 拡散式へのあてはめ結果

		中性化領域		非中性化領域	
		C_o (kg/m ³)	D_c (× 10 ⁻¹² m/s)	C_o (kg/m ³)	D_c (× 10 ⁻¹² m/s)
暴露試験	1年目	5.1	0.6	-	-
	3年目	3.2	40	42	3.6
塩水浸漬	切断なし	6.4	0.6	24	38
	10mm 切断	3.4	53	9.7	68

注) 塩水浸漬の結果は、いずれも事前吸水ありの結果。

中性化領域の塩化物イオン濃度の分布は、定常的に流入する傾向があることから、次の移流拡散式³⁾で表されるか概略の当てはめを行った。

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (1)$$

ここに、 c : 塩化物イオン濃度、 x : 深さ、 t : 時間、 u : 流速、 D : 係数(ここでは拡散と分散を区別していない)

暴露 1, 3 年目の床版部の塩化物イオンの浸透について、表面の塩化物イオン濃度 C_o が常時一定とした場合について当てはめた結果を表-4、図-13に示す。Case1は、1年目と3年目の実測値を対象に最小二乗法により得られた結果を示す。同様に、Case2は3年目の実測値を対象にして得られた結果を示す。Case1, 2ともに、計算値の1年目と3年目の変化が実測値に比べて小さい。流速 u と係数 D だけでは、1年目と3年目の変化を説明することができなかった。参考として、Case2について、期間を3箇月とした場合の計算値を図中に示す。前述したとおり、暴露供試体は暴露後に含水率が増加した傾向が見られており、含水率の変化による流速 u や係数 D の変化によって、見掛け上、塩分の浸透開始時期が遅延するような影響を及ぼした可能性があると考えられる。

表-4 移流拡散式への当てはめ

	C_o (kg/m ³)	D (× 10 ⁻¹⁰ m ² /s)	u (× 10 ⁻⁹ m/s)	当てはめの対象データ
Case1	3.0	3.4	3	1, 3年目
Case2	3.5	1	6	3年目のみ

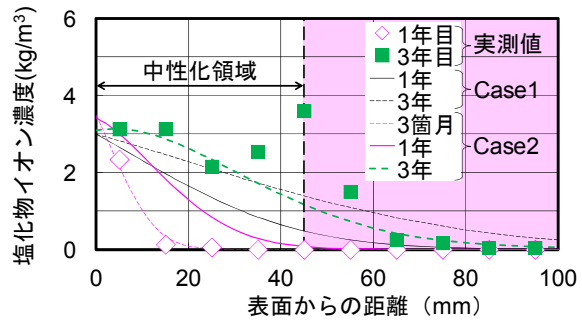


図-13 移流拡散式への当てはめ

7. まとめ

暴露試験、塩水浸漬試験ともに、45mmの厚い中性化領域であっても、外部からコンクリート中に浸入した塩化物イオンが非中性化領域に向かって移動して、中性化境界付近の非中性化領域で濃縮し、さらに深い方へ拡散することを確認した。その濃縮は、中性化領域と非中性化領域の拡散係数の顕著な違いによるものか、あるいは何らかの現象で中性化領域を通過した塩化物イオンが非中性化領域でなお拡散現象に支配されることによるものかのいずれかであると推察される。中性化領域の塩化物イオン濃度は深さ方向の変化が小さく、現時点では中性化領域の塩化物イオンの移動が非中性化領域の拡散現象と同じであるか、必ずしも断定できない。

謝辞

本暴露試験は、「沖縄県離島架橋100年耐久性プロジェクト」の下、沖縄県及び(財)沖縄県建設技術センターの協力を得て実施している。部材を提供された道路管理者を含め、暴露試験にご協力いただいた関係各位に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 例えば、河野広隆、渡辺博志、田中良樹：コンクリートのひび割れ部の塩分浸透、土木研究所資料第3950号、2004.11.
- 2) 小林一輔、白木亮司、河合研至：炭酸化によって引き起こされるコンクリート中の塩化物、硫黄化合物及びアルカリ化合物の移動と濃縮、コンクリート工学論文集、1-2、pp.69-82、1990.7.
- 3) 齋藤大作、星清：移流拡散方程式の解析解(1)、開発土木研究所月報、No. 533、pp.13-19、1997.10.
- 4) 佐伯竜彦、米山紘一、長滝重義：中性化によるモルタルの強度変化、土木学会論文集、No. 451、pp.69-78、1992.8.