

# 論文 中性化領域における塩分移動メカニズムに関する考察

青山 實伸<sup>\*1</sup>・有馬 直秀<sup>\*2</sup>・北川 勝明<sup>\*3</sup>・川村 満紀<sup>\*4</sup>

要旨：中性化した部位では，塩化物イオンが短期間に非中性化領域に移動する現象が確認されている。このメカニズムを解明するために，38年経過したRC床版下面より採取したコアを用いて，中性化部分，中性化から非中性化領域への移行部分および非中性化部分から，円板状の試験体を切り出し，それぞれ吸水・乾燥に伴う密度変化や透水量の試験を実施した。その結果，中性化部分は非中性化部分に比べ，吸水は遅いが乾燥が速く進み，透水しやすいことがわかった。中性化によって水分の移動特性が変化するために，浸透した塩化物イオンは，乾湿繰り返しによって，短期間に中性化領域から非中性化領域に移動すると推察された。  
 キーワード：中性化，塩化物イオン，吸水，乾燥，水分移動

## 1. はじめに

北陸地方のコンクリート構造物では，塩害やアルカリ骨材反応による劣化が顕在化している。また，コンクリートの中性化が塩害による劣化を助長しているようである。特に雨水のかからないRC床版部材では，中性化の進行が早いことがわかってきている<sup>1)</sup>。すなわち，鋼橋RC床版では，凍結防止剤散布（塩害）と中性化による鉄筋腐食の複合劣化が顕在化しつつある。

十分に除塩されていない海砂を含むコンクリートでは，中性化が進行すると塩化物を固定化しているフリーデル氏塩は分解し，塩化物イオン（以下，塩分）が解離し，それが内部に向かって移動するために，非中性化部分の塩分の濃度が高くなると考えられている<sup>2)</sup>。しかし，海砂を含まないコンクリートにおいても，中性化が進行するとともに凍結防止剤の影響を受ける部位では，非中性化部分の塩分濃度が高くなっている構造物が多く見られる<sup>3)</sup>。著者らは，年月を経て中性化が進行したRC床版から採取したコアを用いて，塩分浸透促進試験と自然曝露試験によって，中性化領域に浸透した塩分が短期間に非中性化領域に移動する現象を確認している<sup>3)</sup>。

本論文は，塩分が短期間に非中性化部分に移動するメカニズムを解明することを目的としている。そのため，38年経過したRC床版下面より採取したコアを用いて，中性化部分，中性化領域から非中性化領域への移行部分および非中性化部分から，円板状の試験体を切り出し，それぞれの吸水・乾燥に伴う密度変化や透水量を求める試験を実施した。試験結果から，吸水・乾燥による飽和度の変化等に注目して，塩分が移動するメカニズムを考察した。併せて，促進試験で中性化させた試験体の吸水・乾燥過程の水分移動性状も検討した。

## 2. 中性化した構造物の塩分濃度分布<sup>4)</sup>

凍結防止剤の影響を受ける条件下で，建設後29年経過した橋台より採取したコンクリートコア（径75mm）を用いて，コンクリート中の塩分濃度分布，中性化深さおよびコンクリート内部にある塩素の分布状況（EPMA分析）を調査した事例を図-1に示す。コアを採取した時期は，その年の冬期における凍結防止剤散布終了後約7ヶ月が経過した秋期である。図-1には塩分濃度分布および塩素に対するEPMA分析結果（塩素の面分析）を示

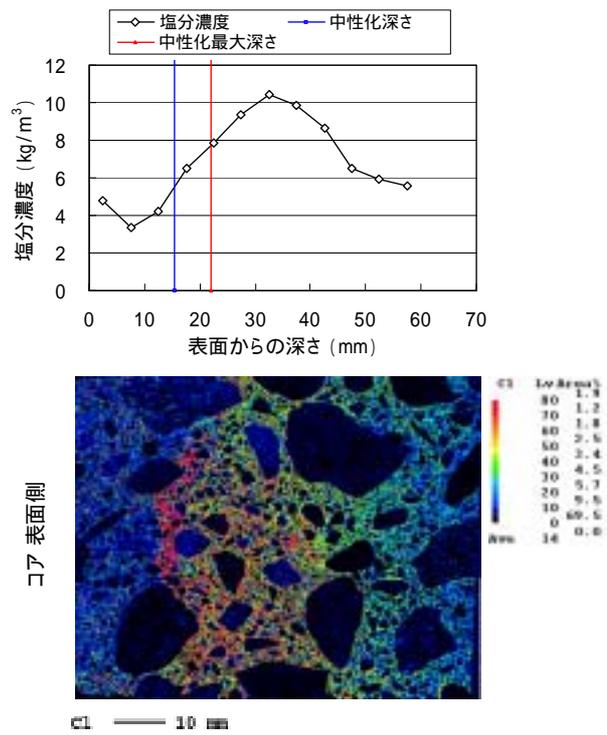


図-1 中性化した実構造物の塩分濃度分布(上)および塩素に関するEPMA分析結果(下)<sup>4)</sup>

\*1 中日本ハイウェイ・エンジニアリング名古屋(株)金沢支店 道路技術部 博(工)(正会員)

\*2 中日本ハイウェイ・エンジニアリング名古屋(株)金沢支店 構造技術課 (正会員)

\*3 中日本ハイウェイ・エンジニアリング名古屋(株)金沢支店 構造技術課

\*4 中日本ハイウェイ・エンジニアリング名古屋(株)金沢支店 特別技術顧問 金沢大学名誉教授 工博(名誉会員)

す。塩分濃度は、コアの各層を粉碎し JIS A 1154(電位差滴定法)によって測定した。中性化深さは JIS A 1152 に準じてコア表面で測定し、図中に中性化さ(平均値)と測定した中性化最大深さを示している。EPMA 分析は、同じコアの中心から約 20 mm 離れた位置を切断して観察した。塩分濃度は、表面近くでやや高く、深さ 10 mm 付近で最も低く、深さ 30 mm 付近で最大になっている。また、EPMA 分析で得られた塩素の濃度分布からもコンクリート中の塩分濃度は、中性化と非中性化領域の境界付近で最も高く、それ以深で漸減していることがわかる。このことは冬期間に浸透した塩分が短期間に非中性化領域に移動していることを示している。

### 3. 試験概要

#### 3.1 試験体概要

##### (1) 試験体を採取した RC 床版の概要

試験体に用いたコア(径 75 mm)は、長野県伊那地域で取り替えられた鋼橋 RC 床版下面から採取した。RC 床版は、1974 年に施工され、38 年経過している。RC 床版コンクリートの設計基準強度は 24 N/mm<sup>2</sup>であり、推定される示方配合を表 - 1 に示す。

採取コアの周面で JIS A 1152-2002 に準じて測定した中性化深さ、その結果から求めた中性化速度係数およびコンクリート標準示方書に与えられている値を表 - 2 に示す。コアの中性化深さは約 20 mm、その中性化速度係数は、示方書に与えられている値の 3 倍であり、中性化の進行が早いことがわかる。

##### (2) 試験体の作製

試験体は、床版下面から採取したコア(3 本)から、

表 - 1 コンクリートの示方配合

セメント (kg/m <sup>3</sup> )	水 (kg/m <sup>3</sup> )	水セメント比	粗骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	細骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	AE 混和剤 (kg/m <sup>3</sup> )
300	152	0.51	1,157	793	0.75

表 - 2 中性化深さおよび中性化速度係数

中性化深さの測定値(mm)		中性化速度係数(mm/年)	
平均値	標準偏差	測定値	示方書の値
18.5	3.9	3.0	1.0

図 - 2 に示すように中性化している部分、中性化領域から非中性化領域への移行部分、非中性化部分から、円板状の試験体を切り出して、それぞれ 3 個作製した。

中性化を促進させてその水分移動性状を確認するための試験体は、非中性化部分のコアを用いて中性化促進試験を実施した後、上述の試験と同様に円板状の試験体を 1 個作製した。中性化促進試験は、周面および底面をエポキシ樹脂で被覆して、CO<sub>2</sub> 5% ,RH 60% ,温度 40 の条件で 91 日間行った。

作製した各試験体の名称および主要寸法を表 - 3 に示す。

#### 3.2 試験方法

##### (1) 吸水試験

吸水率試験は JSCE-K571-2004 に準じて、数日間自然乾燥して質量変化が無くなった後の気乾状態の試験体を 23 の水中に浸した。1, 2, 4, 8, 24 時間, 2, 4, 7 日後において試験体を水中から取り出して表面の水分を拭きとって質量を 0.01g 単位で測定して吸水量(測定質量 - 気乾状態質量)を求めた。最後の 7 日目においては試験体を水中に浸漬した後、減圧脱気し気泡が生じなくなった時点において飽和状態とした。減圧脱気後の水中質量を 0.1g 単位で測定し、密度を算定するための脱気体積とした。

試験開始時の質量を気乾状態、脱気後の質量を飽和状態とみなしてそれらを脱気体積で除してそれぞれの密度とした。各吸水過程の密度も同様に求めた。

吸水、乾燥および透水量試験における結果は、3 個の平均値であり、中性化促進試験では 1 個のみに対する値である。

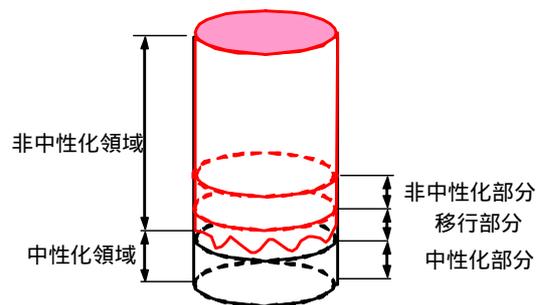


図 - 2 試験体の作製

表 - 3 各試験体の名称および主要寸法

名称	個数	試験体の厚さ(mm)	直径(mm)	コアの中性化深さ(mm)
中性化部分	3	18.4, 19.1, 16.8 (平均値 18.1)	74.4	19.5, 23.3, 18.7
移行部分	3	14.6, 15.0, 16.8 (平均値 15.3)	74.1	
非中性化部分	3	15.7, 17.3, 16.8 (平均値 16.6)	74.3	
中性化促進試験	1	17.5	74	

## (2) 乾燥試験

吸水試験終了後の飽和状態の試験体を、恒温室(23℃, RH42%)で乾燥させて質量の経時変化を測定した。質量の測定は、1, 2, 3, 4, 6, 8, 10, 12, 24 時間, 2, 3, 4, 7 日後に、0.01g 単位で行った。その後 50℃ の恒温乾燥器の中に、質量の変化がなくなるまで(11 日間) 存置してその状態を絶乾とみなし、絶乾質量を脱気体積で除して絶乾密度とした。各乾燥過程の密度も同様に求めた。

## (3) 透水量試験

透水量試験は JSCE-K571-2004 を準用して実施した。乾燥試験の終了後試験体(75 mm)の周面をエポキシ樹脂でコーティングし、試験体の質量変化がなくなった時点で 60 mm のロートとメスピペットなどの試験器具を接着固定し、シーリング材でロート周囲を止水して透水量試験を開始した。試験開始後、1, 2, 3, 24 時間, 2, 3, 4, 7 日後の透水量(各測定時点の透水総量)を 0.01ml 単位で計測した。

## 4. 試験結果および分析

### 4.1 試験結果

#### (1) 密度変化

各試験体の絶乾、気乾、飽和状態の密度を図-3に示す。図より、密度は、非中性化部分、移行部分、中性化部分の順に大きくなり、中性化によって密度が増大していることがわかる。気乾状態から飽和状態への密度の変化量が、絶乾状態から気乾状態への密度の変化量より大きくなっている。促進試験を実施した試験体の密度は非中性化部分のそれにほぼ等しいが、絶乾状態で少し増加する。

#### (2) 吸水試験

吸水試験によって得られた時間に伴う吸水率(吸水量÷気乾質量(%))の変化を図-4に、時間に伴う密度の変化を図-5に示す。図-4より、各試験体とも、浸漬直後に大きく吸水して、その後の増加は小さい。吸水率は、中性化部分が最も小さく、移行部分、非中性化部分の順に大きくなっている。いずれの試験体においても、吸水率は時間にもなって漸増している。中性化促進試験体の吸水率ももっとも大きい。このことは促進試験によってコンクリート組織が変化したことを示唆している。図-5より、吸水に伴う密度の増大割合は、24 時間経過後は小さくなっていることがわかる。中性化促進試験体の密度変化の経過は、中性化部分よりもむしろ非中性化部分のそれと似ている。

#### (3) 乾燥試験

乾燥試験によって得られた時間に伴う蒸発率(蒸発量÷飽和質量(%))および密度の変化を、それぞれ図-6、図-7に示す。図-6より明らかなように、試験体から

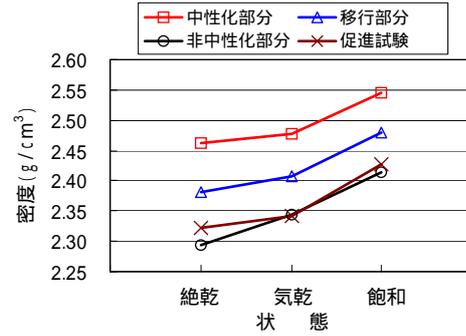


図-3 各試験体の密度

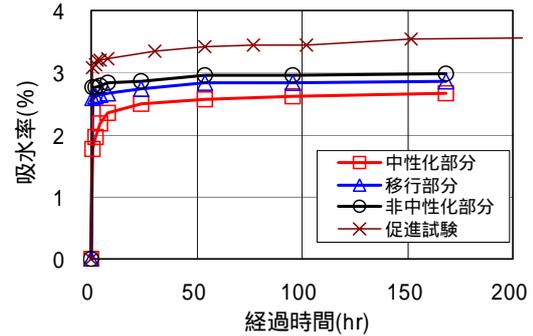


図-4 各試験体の時間に伴う吸水率の変化

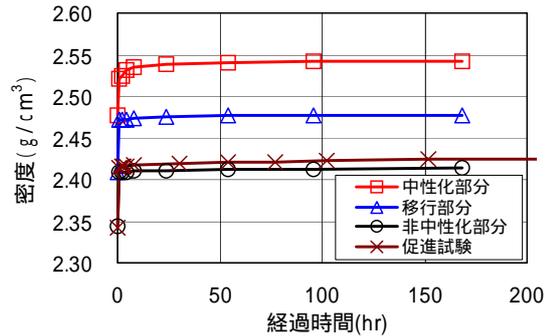


図-5 吸水試験での時間に伴う密度の変化

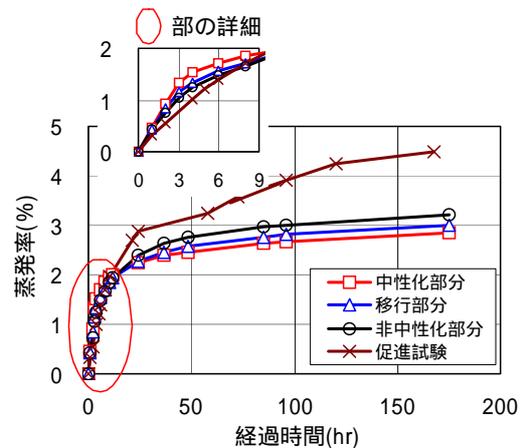


図-6 各試験体の時間に伴う蒸発率の変化

の水分の逸散速度は、各試験体とも時間に伴って漸減する。乾燥開始直後の水分の蒸発は、中性化部分が少し早く減っている。

中性化促進試験体では、蒸発率が大きく、時間に伴う変化の推移もコンクリートコアからのものと異なっている。図 - 7 より、乾燥に伴う各試験体の密度は漸減していき、中性化部分では初期の密度の低下割合が大きくなっている。移行部分の密度は、中性化部分と非中性化部分の概ね中間の値を示している。中性化促進試験体の密度は、非中性化部分と移行部分の中間にある

(4) 透水量試験

透水量試験によって得られた時間に伴う透水量の変化を図 - 8 に示す。図より明らかなように、中性化部分の透水量は、非中性化部分のそれより大きい。移行部分の透水量は、中性化部分と非中性化部分の中間の値を示している。中性化促進試験体は、中性化部分より更に大きい透水量を示す。このことから、中性化の促進過程においてもコンクリート内部組織に大きな変化が生じたことが推定される。

4.2 試験結果の考察

(1) 吸水および水分逸散過程の評価

吸水および乾燥試験から得られた 48 時間までの吸水率と蒸発率の変化を図 - 9 に示す。図より、全体として吸水は急速に、蒸発はゆっくり進むことがわかる。中性化部分と非中性化部分と比較すると、中性化部分の吸水は非中性化部分と比べて緩やかに進み、蒸発は中性化部分が非中性化部分より早く進むことがわかる。移行部分は、中性化部分と非中性化部分の間の挙動を示している。

吸水と蒸発の時間経過に伴う飽和度の挙動を見てみる。吸水および乾燥試験より得られる飽和状態と絶対乾燥状態間の密度差が試験体の内部空隙であると仮定して、密度の測定値から内部空隙に含まれる水の比率を求めて飽和度とする。密度および飽和度の算定値の一部を表 - 4 に示す。48 時間までの吸水および乾燥に伴う水分逸散過程での飽和度の変化を図 - 10 に示す。図より、吸水過程では、非中性化部分は吸水開始直後に飽和度 95% になる。中性化部分では、吸水直後に飽和度は 70% になった後漸増し、半日程度で飽和度 90% になる。他方、水分逸散過程では、中性化部分の飽和度は 12 時間後に 38% まで急激に低下するが、非中性化部分のそれは 12 時間後に 61% であり、より高い状態となっている。

コンクリートの中性化領域では、吸水過程で飽和度が 90% に達するのに半日程度を要するが、水分逸散過程で内部空隙から水分が短時間で逸散する状態にある。逆に、非中性化領域では、吸水過程で短時間に内部空隙に水分が浸透し飽和状態近くに達し、水分逸散過程では内部空隙中の水分が逸散しにくい状態になっている。

(2) 中性化部分における水の移動特性

前項の吸水および水分逸散過程に関する実験結果を踏まえて、中性化部分における水の移動特性について考

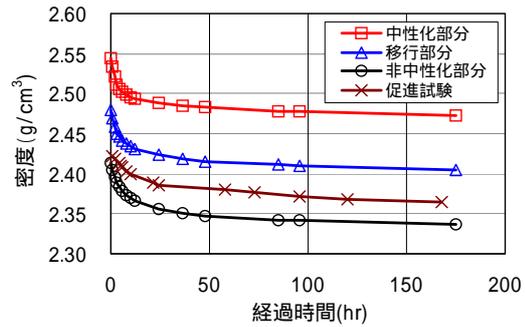


図 - 7 乾燥試験での時間に伴う密度の変化

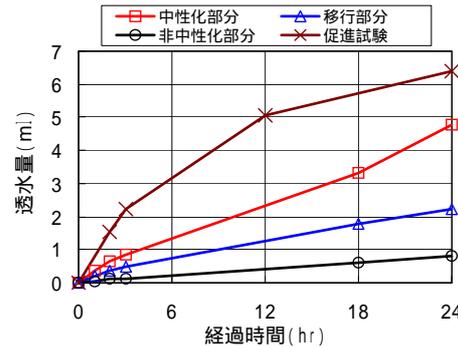


図 - 8 各試験体の時間に伴う透水量の変化

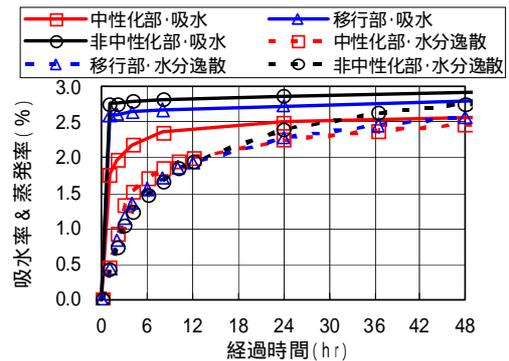


図 - 9 48 時間までの吸水率と蒸発率の変化

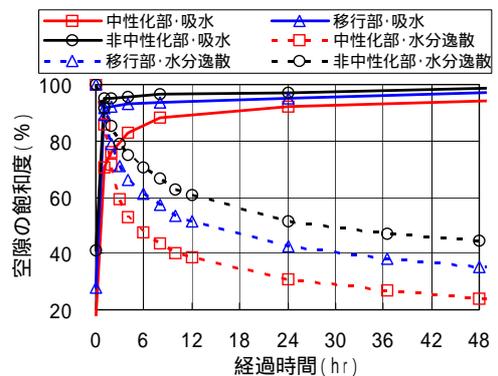


図 - 10 吸水および水分逸散過程での飽和度の変化

察する。

中性化部分は非中性化部分より密度が増大している。このことは中性化によって組織が緻密化していることを示している。したがって、図 - 4 に示されるように、中

表 - 4 中性化部分と非中性化部分の密度および飽和度の算定値の一部

区分	吸水過程				蒸発過程				適用
	密度		飽和度 (%)		密度		飽和度 (%)		
	中性化	非中性	中性化	非中性	中性化	非中性	中性化	非中性	
開始時	2.477	2.343	17.5	41.1	2.545	2.414	100.0	100.0	開始時：吸水：気乾状態 蒸発：絶乾状態 完了時：吸水：飽和状態 蒸発：絶乾状態  【飽和度の算定方法】 = $\frac{(\text{測定密度} - \text{絶乾密度})}{(\text{飽和密度} - \text{絶乾密度})} \times 100$
1時間後	2.512	2.408	70.4	95.1	2.533	2.404	86.0	91.5	
2時間後	2.525	2.408	76.2	95.3	2.522	2.396	71.7	85.1	
4時間後	2.531	2.409	82.6	95.8	2.506	2.384	53.0	75.0	
8時間後	2.535	2.410	88.1	96.5	2.498	2.374	43.4	66.5	
24時間後	2.539	2.411	92.2	97.2	2.488	2.356	30.9	51.6	
48時間後	2.541	2.413	94.6	98.8	2.482	2.347	24.1	44.3	
完了時	2.545	2.414	100.0	100.0	2.462	2.294	0.0	0.0	

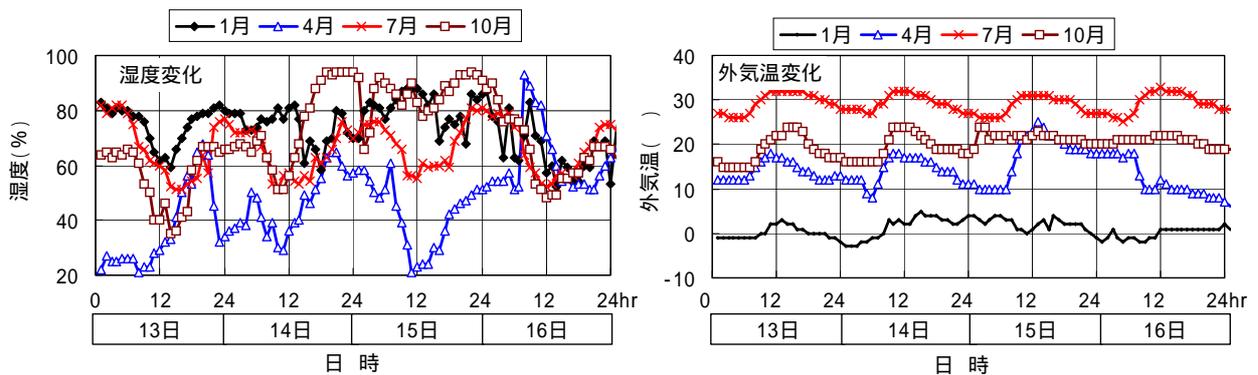


図 - 11 1月, 4月, 7月および10月の4日間の湿度と外気温の時間変化の事例(金沢: 2011年)

性化部分が非中性化部分より吸水しにくくなる。

水分逸散過程では、組織が緻密化している中性化部分が非中性化部分に比べ水分逸散速度が速くなっている。これは、中性化部分では組織の緻密化（全細孔率は多少減少）するが、粗い細孔の占める割合が増大することに関係している現象と推察される<sup>5)</sup>。

透水量試験では、中性化部分の透水量が非中性化領域のそれより大きくなっている。このことは、中性化によって粗な細孔の割合が増大するためと考えられる。

中性化促進条件下に曝された試験体では、密度は変化しないが、吸水率、蒸発率、透水量のいずれも大きくなっている。このことは、促進試験によって短期間に中性化が生じたコンクリートの組織は、数十年にわたって徐々に中性化が進行した実際のコンクリート部分のそれとは異なることを示している。

(3) 実際の構造物における吸水・水分逸散過程の挙動

気象データと、吸水・乾燥性の評価結果に基づき、実際の構造物における飽和度の変化を推定してみる。

金沢の気象データより得られた、1月, 4月, 7月および10月の4日間の湿度と外気温の時間変化の事例を図-11に示す。図より、湿度の1日間の変化は、昼間は低く夜間が高くなり、概ねこのサイクルが繰り返されていることがわかる。なお、降雨や降雪が続く場合には、

昼間においても高い湿度が継続する（例えば、1月15日や10月15日）。4月のように低い湿度が長時間継続する場合もある。水分逸散の速度は、温度にも依存し、夏期では速く、冬期では遅くなると推定される。

外気と接するコンクリート表面部の中性化領域では、外部気象の影響を受けて、吸水過程や水分逸散過程の繰り返しが生じていると考える。降雨や降雪が続く場合や、夜間で湿度が高くなる時間帯では、水分が吸水されると推定する。昼間の湿度が低くなる時間帯は、水分がコンクリートから逸散し、とくに湿度の低い時間が長く継続する場合や温度が高い昼間の時間帯では、水分逸散が活発になって、中性化領域全体にわたって飽和度の低い状態になると推定する。

他方、深部の非中性化領域では、中性化領域が介在するために外部気象の影響を受けず、中性化領域と接する部分の空隙内部の影響を受けると推定する。したがって、当初より飽和に近い状態にある非中性化領域では、短時間に吸水が急速に進むことや内部空隙の水分が移動しにくい状態にあることから、高い飽和度の状態が持続していると推定する。

(4) 塩分移動メカニズム

上述の考察から、中性化領域では、外部気象の影響を受けて吸水と水分逸散による乾湿が繰り返され、吸水過

程では半日程度で高い飽和度になり、乾燥過程では水分が短時間に中性化領域から逸散すると推定された。したがって、コンクリート表面に付着した塩分は水分に溶解すると比較的短時間にコンクリート内部に吸水されると考えられる。つぎに、乾燥過程での水分逸散は、コンクリート表面から始まり、時間の経過とともに次第に内部に向かって進んでいくと考えられる。この過程において、水分に含まれる塩分の多くは、内部に残存し、次第に内部に向かって濃縮されていくと考える。水分逸散が活発な時期には、乾燥部分が中性化領域背面まで進み、非中性化領域との境界付近で塩分を含む水分が濃縮されると推定する。すなわち、この吸水と水分逸散の繰り返しによって、塩分は中性化領域の細孔の壁への物理的吸着の影響を受けながら移動し、残りの多量の塩分は中性化領域と非中性化領域の境界面内側に順次濃縮されていくと推定する。非中性化領域と中性化領域の境界付近に濃縮された塩分は、それ以深ではおもに濃度差拡散によって浸透して行くと考えられる。その結果、境界面付近で最も塩分濃度が高くなり、内部に向かって塩分濃度が漸減する塩分濃度分布になると推察される。

採取したコアから得られる深さ方向の塩分濃度分布は、図-1(上)に示したような形状となる。骨材やセメント粒子の配置のばらつき(コンクリートの不均質性)があるため中性化深さは場所によって異なるので、それに伴って塩分の濃縮されている境界面の深さも異なっている。そのため、塩分濃度分布は最大塩分濃度を示す位置から表面に向かって漸減する形状になると推定する。最大塩分濃度を示す深さは、コア断面内部の最大中性化深さの位置と一致していると考えられる。なお、表面近くで塩分濃度が高くなっているのは、コンクリート表面数mmの範囲に付着・浸透している塩分濃度が高いことの影響である<sup>6)</sup>。

## 5. まとめ

年月を経て中性化したRC床版下面から採取したコアより作製した試験体を用いて実施した、中性化部分と非中性化部分の吸水・乾燥等に関する試験結果、およびその結果から推察した塩分移動メカニズムをまとめると次のようになる。

- (1) 中性化によって組織が緻密化してコンクリートの密度は大きくなるが、透水量は大きくなり、蒸発が早くなる。中性化部分も非中性化部分のいずれにおいても吸水は急速に進む。
- (2) 中性化促進条件下に曝された試験体では、密度は変化しないが、吸水率、蒸発率、透水量のいずれも大きくなっている。このことは、促進試験によって短時間に中性化が生じたコンクリートの組織は、数十

年にわたって徐々に中性化が進行した実際のコンクリート部分のそれとは異なることを示している。

- (3) 中性化部分では、吸水によって飽和度が90%に達するのに半日程度要するが、水分逸散過程では内部空隙から水分が短時間に逸散する状態にある。他方、非中性化部分では、短時間に吸水して内部空隙が飽和状態近くになり、乾燥過程では内部空隙の水分が移動しにくい状態になっている。これは、中性化部分では組織の緻密化(全細孔率は多少減少)するが、粗い細孔の占める割合が増大することに関係している現象と推察される。
- (4) 外気と接するコンクリート表面部の中性化領域では、外部気象の影響を受け、吸水と水分逸散が繰り返され、非中性化領域では、飽和度の高い状態が持続されていると推定する。
- (5) コンクリート表面に付着した塩分は水分に溶解すると短時間にコンクリート内部に移動し、中性化領域全体が吸水と乾燥の繰り返しを受ける。その結果、中性化領域と非中性化領域の境界面付近に塩分が濃縮し、それ以深では塩分は濃度差拡散によって非中性化領域内部へ浸透して行くと考えられる。

謝辞 中性化促進試験の実施にあたっては、金沢工業大学 宮里心一教授のご協力をいただきました。ここに謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 青山 實伸,石川 裕一,足立 嘉文,西尾 守広: 北陸地方での道路構造物の中性化深さの進行特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.635-640, 2010.7
- 2) 小林一輔: コンクリート構造物の早期劣化と耐久性診断, 森北出版社, p.144, 1991.7
- 3) 青山 實伸,石川 裕一,武内 道雄,川村 満紀: 中性化の進行した道路構造物の塩化物イオン浸透特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.809-814, 2011.7
- 4) 川村 満紀, 青山 實伸: 現場技術者のための塩害対策ノート, 北国新聞社, pp.54-55, 2012.7
- 5) C.L. Page and V.T. Ngala, Steady -State Diffusion Characteristics of Cementitious Materials, Proceedings of the International RILEM Workshop on Chloride Penetration into Concrete, pp.77-84, 1995.
- 6) 青山 實伸,北川 勝明,有馬 直秀: 凍結防止剤による中性化した実構造物の塩分浸透特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.772-777, 2012.7