

論文 塩水浸漬温度がコンクリート中への塩分浸透速度に与える影響についての実験的研究

砂川 恒雄*1・富山 潤*2

要旨: 本研究では、「乾湿繰り返し試験」において、コンクリート供試体を浸漬する水の温度と乾燥温度の違いが、コンクリート中への吸水、水の逸散にどのような影響を与えるかを実験によって確認した。また、「塩水浸漬－乾燥繰り返し試験」において、供試体の乾燥温度を 50℃一定とし、供試体を浸漬する塩水の温度を 50℃と 20℃に設定した実験の結果から、塩水の浸漬温度の違いはコンクリート中への塩分の浸透速度に影響を与えないということを確認した。

キーワード: 塩水浸漬－乾燥繰り返し試験, 塩水浸漬温度, 塩分浸透速度

1. はじめに

近年、建設後数十年が経過した建設物の維持管理や、新設構造物の高耐久化が喫緊の課題となっている。建設構造物の劣化の形態として、塩害、中性化、アルカリ骨材反応などがある。その中でも、周辺を海洋で囲まれ、劣悪な塩害環境にある沖縄においては、塩害による社会資本の劣化は大きな問題となっている。それらの劣化に対する抑制や補修対策として、多種多様な補修材や含浸材、混和材などの開発がすすめられている。それらの材料の補修効果や高耐久化の効果は、実構造物で検証するには、長い年月を要する。それらの材料の効果を短期間に検証するために、促進試験が行われている。

塩害劣化に対しては、コンクリート中へ塩化物イオンを早く浸透させるために塩水噴霧や塩水浸漬による「乾湿繰り返し試験」が行われる。

コンクリートの乾湿繰り返し試験による塩分浸透実験において、供試体を浸漬する塩水温度と乾燥温度が高い方が、塩分の浸透を促進すると一般的に言われている¹⁾²⁾³⁾⁴⁾。しかし、これらの研究はいずれも浸漬温度と乾燥温度を同温度に設定し、その温度の違いによる浸透速度に関するものである。浸漬の温度と乾燥の温度をそれぞれ変化させ、その温度の違いが浸透速度に与える影響を検討した研究は少ないと思われる。

そこで本研究では、まず乾湿繰り返し試験において、コンクリート供試体を浸漬する水の温度と、乾燥温度が水分の吸水、逸散にどのような影響を与えるかを実験によって確認した。また、塩水浸漬－乾燥繰り返しによる塩分浸透促進試験において、塩水浸漬の温度と乾燥温度の組み合わせパターンによって、コンクリート中への塩分浸透速度がどのように変化するかについて、実験的検討を行った。

さらに、塩分浸透速度に影響を与えるのは乾燥温度以外に、乾燥湿度も影響すると考え、乾湿繰り返し試験の乾燥サイクルにおける温度が高い場合と低い場合の乾燥湿度の測定を行い、考察を行った。併せて供試体を浸漬する塩水に対する濃度調整の有無が、コンクリート中への塩分浸透に与える影響について検討を行った。

2. 実験概要

2.1 供試体内の水の移動に与える浸漬・乾燥温度の影響

コンクリート中の塩分浸透速度は、供試体内の水の移動に大きく依存するとする報告もあり⁵⁾、ここでは供試体を浸漬する水の温度と、乾燥する温度の違いが、コンクリートの吸水と逸散にどのような影響を与えるかを検討した。

(1) 供試体の作製

実験に用いた供試体を写真-1に示す。供試体寸法とコンクリートの配合を図-1および表-1に示す。

(2) 実験方法

図-1に示すような寸法の供試体について、表-2に示す4ケースを設定し、質量測定を行った。

供試体を 20℃及び 50℃の水槽に 7日間浸漬し、水槽から取り出してウェスで表面の水分をふき取り、質量を測定した。その後 7日間、20℃の恒温室と、50℃の乾燥機でそれぞれ乾燥させた後、質量を測定した。



写真-1 供試体の写真

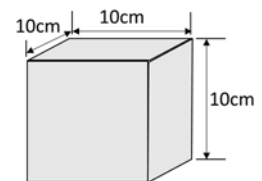


図-1 供試体形状および寸法

*1 琉球大学工学部技術部 技術専門職員 (正会員)

*2 琉球大学工学部環境建設工学科 准教授 博士 (工学)

表-1 コンクリート配合

水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)						
		水	セメント	海砂	砕砂	細骨材	AE 減水剤	空気量調整剤
60	50	170	283	433	481	930	2.8	0.57

表-2 試験ケースと供試体の個数

供試体	試験ケース	実験に用いた供試体数
A	20℃で7日間浸漬し, 20℃で7日間乾燥	3
B	20℃で7日間浸漬し, 50℃で7日間乾燥	3
C	50℃で7日間浸漬し, 20℃で7日間乾燥	3
D	50℃で7日間浸漬し, 50℃で7日間乾燥	3

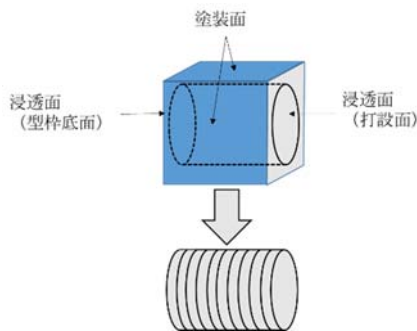


図-2 コア抜き及びスライスのイメージ

これを1サイクルとし, 4サイクル(56日)まで測定を行った。

2.2 浸漬および乾燥温度が塩分浸透速度に与える影響

2.1 節の実験結果を受け, 供試体を浸漬する塩水の温度と, 乾燥する温度の違いがコンクリート中への塩分の浸透速度にどのような影響を与えるかを検討した。

(1) 供試体の作製

実験に用いた供試体の寸法とコンクリートの配合は, 図-1 および表-1 と同様とした。

供試体は, 打設面と型枠底面以外は防水塗装を施し, 塩分が打設面および型枠底面から浸透するようにした。供試体は12体作製した。

(2) 実験方法

作製した供試体について, 表-2 と同様の4ケースで塩水浸漬-乾燥繰り返し試験を行い, 24週目, 36週目, 48週目でそれぞれコンクリート中の塩化物イオン濃度を測定した。なお, 浸漬する塩水の濃度は $[Cl^-]=5\%$ ($[NaCl]=8.3\%$)とし, 塩化物イオン濃度の測定方法として, 塗料の影響や, 塗布面からの塩分の浸透の影響を排除するために, 図-2 および写真-2 に示すように, 供試体の打設面から型枠底面にかけてコアを抜き取り, コアを1cm間隔でスライスして深さ方向の塩化物イオン濃度

の分布状況を測定した。

塩化物イオン濃度の測定は, 供試体の塩分浸透面2面(打設面および型枠底面)から1cmの厚さでスライスし, JISA1154 および JCI-SC4 に準じ, 試料粉碎, 硝酸銀溶液による溶解, 煮沸, 吸引ろ過, 塩化物電極を用いた電位差滴定法により行った。



写真-2 コア抜きの写真

2.3 浸漬温度が塩分浸透速度に与える影響

ここでは, 浸漬温度のみの影響を検証するために, 乾燥温度を50℃に固定し, 浸漬温度のみを20℃と50℃に変化させたときの塩分浸透速度に与える影響を検討した。

(1) 供試体の作製

実験に用いた供試体を写真-3 に示す。供試体形状, 寸法およびコンクリートの配合は, 図-3 および表-1 に示す通りである。なお, 供試体は12体作製した。

図-4 に示すように打設面と型枠底面以外は遮塩性の防水塗料により防水処理を行っており, 塩分浸透は, 打設面と型枠底面からとし, 両面からの塩分浸透量を測定した。なお, 後述する2.2節の実験の結果において, コアの長さが10cmと短かったために, コア中央部分の塩化物イオン濃度が反対側からの塩分浸透の影響で浅い部分よりも高い値を示したため, それを防ぐことを目的にコアの長さを20cmとした。



写真-3 供試体の写真

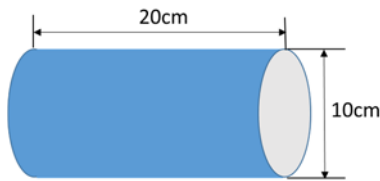


図-3 供試体形状および寸法

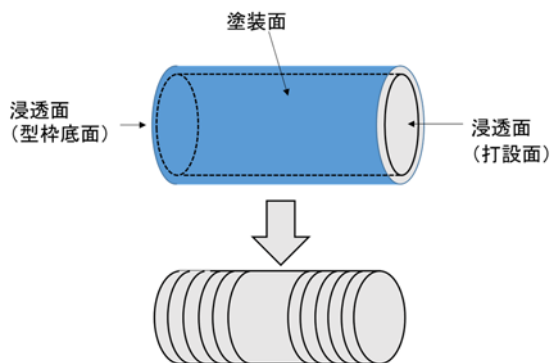


図-4 コア抜きおよびスライスのイメージ

(2) 実験方法

図-3 に示すような寸法の供試体について、表-3 に示す 2 ケースで塩水浸漬－乾燥繰り返し実験を行い、4 週目、12 週目、24 週目でそれぞれ 2 個の供試体を取り出し、塩化物イオン濃度を測定した。

作製したシリンダー供試体から、塩分浸透面以外（防水塗装面）からの塩分浸透の影響を排除するために、図-4 および写真-4 に示すようにコアを抜き取り、両端部から 1cm 間隔でスライスし、深さ方向における塩化物イオン濃度分布を測定した。なお、浸漬する塩水の濃度は $[Cl^-]=5\%$ ($[NaCl]=8.3\%$) とした。

2.4 乾燥時の湿度や塩水溶液の温度管理

後述するように、2.2 節の実験により乾燥温度の高い方が塩化物イオン濃度が高くなるとの結果を得た。その結果を受け、乾燥サイクルにおける湿度の影響についても考察するために湿度を測定した。実験を行った 50℃の乾燥機と 20℃の恒温室内において、それぞれ 10 分間隔で約 24 時間の湿度変化を測定した。

また塩水浸漬－乾燥繰り返し実験における塩水浸漬のサイクルにおいて、塩水中の塩化物イオン濃度を調整しなかった場合、継続的な濃度変化が塩分浸透に影響を及ぼすと考えられるので、塩化物イオン濃度の経時変化を測定した。50℃の乾燥機および 20℃の恒温室内に塩水の入った水槽を 150 日間静置した。実験中は、電位差自動滴定装置を用い、塩水中の塩化物イオン濃度を月に一度の間隔で測定した。



写真-4 コア抜きの写真

3. 実験結果および考察

3.1 供試体内の水の移動に与える浸漬および乾燥温度の影響

浸漬温度と乾燥温度の違いによる供試体の質量変化の測定結果を図-5 に示す。

供試体の質量変化は、水槽から取り出したときと、水槽に浸漬する直前の質量を基準質量とし、測定した時の質量と基準質量との差として表している。なお、図中の凡例「20-50」は 20℃で浸漬、50℃で乾燥の試験ケースを示している。

その結果、20℃で乾燥させた場合と 50℃で乾燥させた場合を比較すると、浸漬温度の高低にかかわらず、50℃で乾燥させた場合の方が質量変化が大きいということが確認できた。

乾燥温度が 20℃では、35 日目までは浸漬温度 20℃と

表-3 試験ケースと供試体の個数

供試体	試験ケース	実験に用いた供試体数
A	20℃で 7 日間塩水に浸漬し、50℃で 7 日間乾燥	6
B	50℃で 7 日間塩水に浸漬し、50℃で 7 日間乾燥	6

50℃の質量変化に差が見られたが、それ以降は差が認められなかった。乾燥温度 50℃では終始浸漬温度による差は認められなかった。

0日から7日にかけて、浸漬過程であるにも関わらず、「50-20」と「50-50」の質量変化が減少しているのは、この期間は、28日間の水中養生期間後の浸漬継続期間であり、供試体を50℃で浸漬し、水槽から取り出してウェスで拭いてから質量を測定したため、そのタイムラグによる質量減少と考えられる。

また、試験終了時の吸水量(試験前質量-試験後質量)は、浸漬温度の違いによる差はさほど大きくはない。

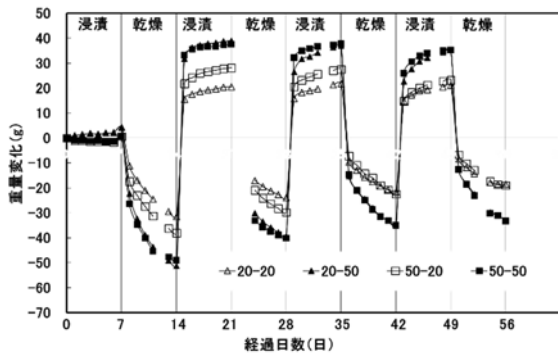


図-5 浸漬と乾燥の温度の違いによる質量変化

3.2 浸漬および乾燥温度が塩分浸透速度に与える影響

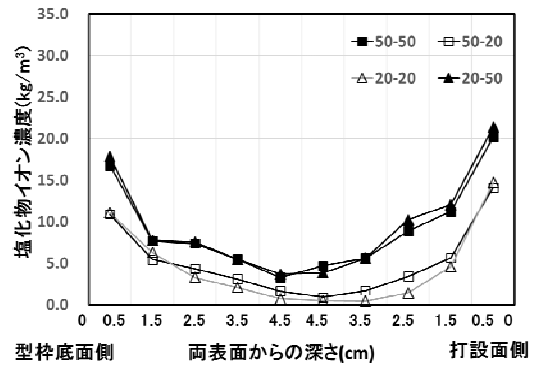
浸透面から深さ方向の塩化物イオン濃度の 24 週目、36 週目、48 週目の測定結果を図-6 に示す。なお、図中の凡例「20-50」は、20℃で浸漬、50℃で乾燥の試験ケースを示す。

測定結果より、型枠底面(供試体下部)より打設面(供試体上部)の方が塩分の浸透量が多いのが確認できる。これは、供試体の上部よりも下部の方がコンクリートの組織が緻密になっていることに起因していると考えられる。

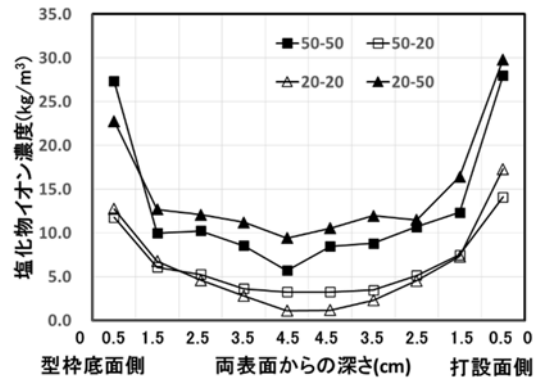
この測定結果の中で、48 週目の値が表面から 4~5cm の深さのところ、それより浅い部分よりも塩化物イオン濃度が大きくなる傾向にあるが、これは供試体の高さが 10 cm であるのに対し、塩分の浸透量が大きく、反対側からの塩分浸透が重なったためと思われる。

また、3 回の測定結果のいずれも、乾燥温度の高い方が塩分の浸透速度が大きいことが確認できる。しかし、浸漬温度に着目すると、浸漬温度が 20℃でも 50℃でも塩分の浸透速度には大差がないことが見て取れる。これは 3.1 節の水分の移動の測定結果と相関があると考えられる。24 週目と 36 週目の測定結果によると、浸漬温度 50℃の場合の方が、浸漬温度 20℃の場合よりも塩分浸透速度が小さくなるという結果になった。これは高温によ

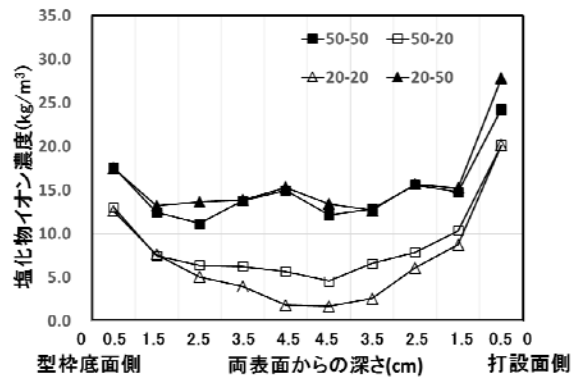
りセメントの水和が促進され、コンクリートの組織が緻密になった結果、塩分の浸透を抑制している可能性がある。



(a) 24 週目



(b) 36 週目



(c) 48 週目

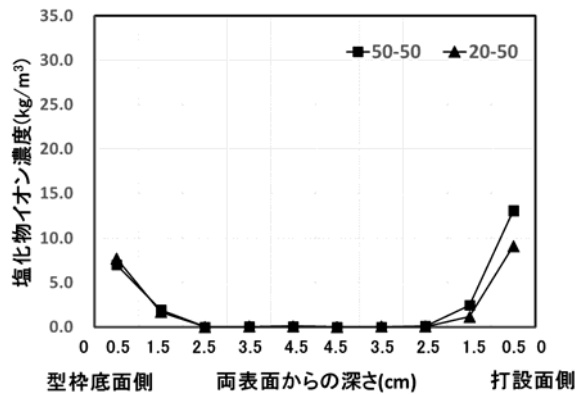
図-6 塩化物イオン濃度分布

3.3 浸漬温度が塩分浸透速度に与える影響

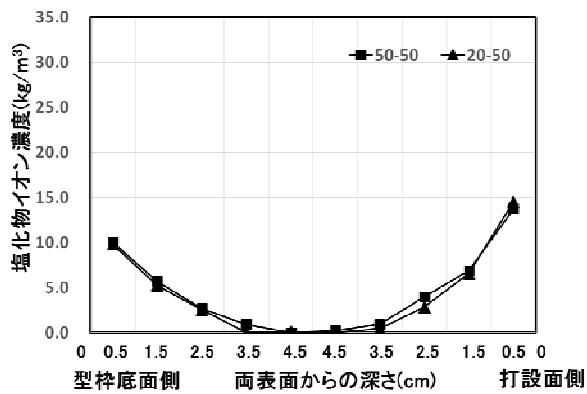
浸透面から深さ方向の塩化物イオン濃度の 4 週目、12 週目、24 週目の測定結果を図-7 に示す。

これらの測定結果によると、4 週目の打設面側は、浸漬温度 50℃の方が塩分浸透速度が大きい、それ以外の深さでは浸漬温度の違いによる塩分浸透速度の大きな差

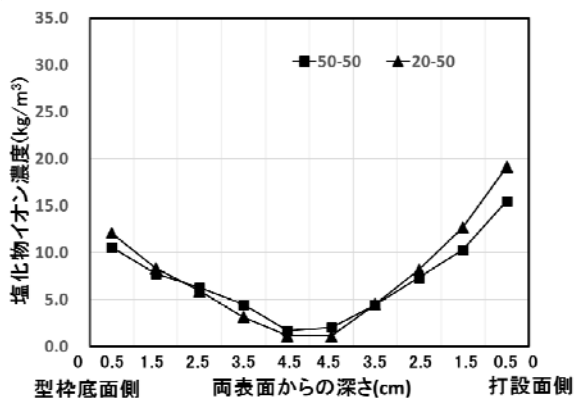
は見られない。4週目の測定結果を除けば、12週目、24週目、および3.2節の24週目、36週目、48週目とも、同様の結果となった。24週目の測定結果では、図-6(a)と同様に乾燥温度 50°Cの場合、浸漬温度 20°Cの方が塩分浸透速度が大きいという結果になった。



(a) 4週目



(b) 12週目



(c) 24週目

図-7 塩化物イオン濃度分布

3.4 乾燥時の湿度や浸漬時の塩水溶液の温度管理

実験を行った 50°Cの乾燥機と 20°Cの恒温室内において、それぞれ 10 分間隔で約 24 時間の湿度変化を測定し

た結果を図-8に示す。なお、乾燥機の温度 (50°C) と恒温室内の温度 (20°C) は期間を通してほぼ一定であったので、図には表示していない。また、恒温室内の湿度が定期的に突出するのは、恒温室のエアコンの霜取り機能によるものである。

この図からわかるように、乾燥温度が 50°Cの乾燥機内の湿度は 10%前後で推移しており、乾燥温度が 20°Cの恒温室内の湿度は概ね 50%から 60%の範囲で推移している。

このことから供試体への塩分浸透速度は、乾燥温度以外に、乾燥湿度が影響している可能性がある。これは乾燥温度を一定とし、湿度を変化させた条件で実験を行い確認する必要がある。

塩水浸漬-乾燥繰り返し実験において、塩水浸漬のサイクルにおいて塩水の塩分濃度を調整しなかった場合の塩分濃度の変化を図-9に示す。

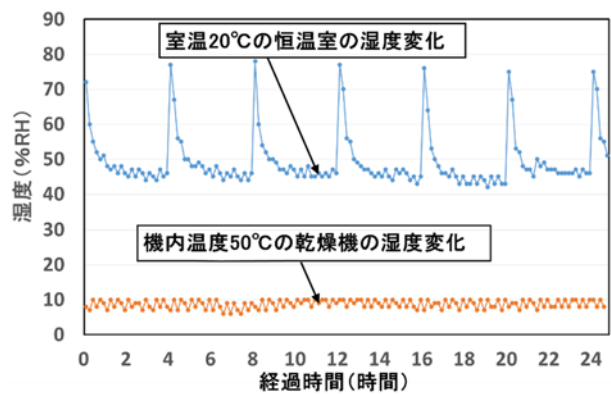


図-8 乾燥サイクルにおける湿度の経時変化

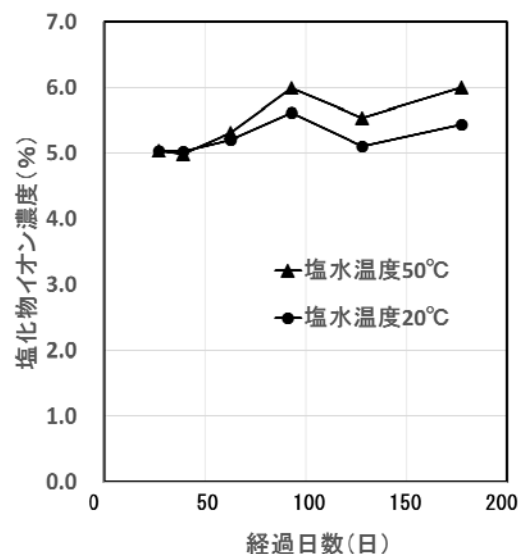


図-9 塩水中の塩化物イオン濃度の経時変化

この図より、塩水浸漬サイクルにおいて、塩水の濃度を調整しなかった場合、塩水温度が高くなるほど、時間の経過とともに塩化物イオン濃度が高くなっていくことがわかった。これは、高温により水分が蒸発したことが原因と考えられる。

浸漬温度が高いときに、コンクリート中への塩分浸透速度が大きくなるのは、塩水の温度の影響だけではなく、塩水の蒸発や濃縮により、塩水の塩分濃度が大きくなり、塩分浸透を促進していることも考えられる。したがって、コンクリート中への塩分浸透速度の比較実験を行う場合、塩分濃度の管理は重要である。

4. まとめおよび今後の課題

コンクリートの塩水浸漬－乾燥繰り返し実験において、供試体を浸漬する塩水の温度がコンクリート中への塩分浸透速度に与える影響について検討した。本研究で行った実験の範囲で得られた知見を以下に述べる。

- (1) コンクリート中への水分の吸水と逸散の量は、乾燥温度が高いほど大きくなるが、乾燥温度が同じであれば、浸漬の温度による差はほとんどないことがわかった。
- (2) コンクリート中への塩分の浸透速度は、型枠底面（供試体下部）よりも打設面（供試体上部）の方が大きくなることがわかった。このことによりコンクリートの沈降や水分の上昇などにより、供試体の下部ほどコンクリートの組織が緻密になり、塩分浸透が抑制されることが確認できた。
- (3) コンクリート中への塩分の浸透速度について、これまでは、乾湿繰り返し試験において、浸漬温度と乾燥温度は、いずれも高い方がコンクリート中への塩分浸透速度が大きいと言われていた。しかしながら、従来の乾湿繰り返し試験は、塩水浸漬と乾燥を同じ温度条件で行っており、これらの温度を変化させて試験した結果、今回の実験結果の範囲では、塩水浸漬温度の高低は塩分浸透速度にそれほど影響を与えないことを確認した。
- (4) 塩水浸漬－乾燥繰り返し実験において、乾燥温度が高いほど塩分浸透速度が大きくなるのは、温度を上昇させたことにより、湿度が下がることによる影響も考えられる。しかし、これはさらに多くの比較実験によって検討を行う必要がある。
- (5) 塩水浸漬サイクルにおいて、塩水の濃度を調整しなかった場合、塩水温度が高くなるほど、時間の経過とともに塩化物イオン濃度が高くなっていくことがわかった。
- (6) 以上のことから、塩水浸漬－乾燥繰り返し実験によ

って塩分の浸透促進試験を行う場合、試験体を浸漬する塩水を加熱するための温熱装置や温度制御装置は必ずしも必要ではなく、室温での塩水浸漬で十分な結果が得られると考えられ、設備費や省エネルギーの面からも有利となる。

また、実験設備が簡易になることによって、より多くの供試体による実験や、パラメータを増やした実験を行うことができ、コンクリートの補修材や含浸材、混和材などの効果をより効率的に検証することが可能になる。

今回の実験では、コンクリート供試体の配合や浸漬する塩水や乾燥の温度、時間サイクルを限られたパターンで行っており、これらの条件を変化させることによって、結果が異なる可能性もある。

したがって、より多くのパラメータで実験を行い、コンクリート中への塩分浸透のメカニズムも含めて、理論的な解析を行い、コンクリートの水セメント比、供試体の寸法、浸漬や乾燥を行う温度や時間の組み合わせなどを定量化し、最も効率的な塩分浸透促進が行えるような条件を確立する必要がある。

また、本研究は無筋コンクリートにおける塩分浸透速度に関する実験結果であり、鉄筋を埋め込んだコンクリート供試体において、鉄筋の腐食促進実験を行う場合は、浸漬温度や乾燥温度が腐食を促進させる可能性もあるため、有筋コンクリートについても同様に温度を変化させた実験を行う必要がある。

参考文献

- 1) 榊田佳寛, 友沢史紀, 安田正雪, 原謙治: コンクリート中への塩化物浸透速度に関する実験, コンクリート工学年次論文集 Vol.10, No.2, pp.493-498, 1988
- 2) SORN Vira, 山田義智, 山根茂之, 大城武: フライアッシュコンクリートの遮塩性と鉄筋の防食性能に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, pp.677-682, 2003
- 3) 徳村忠太, 山田義智: 普通エコセメントを用いたコンクリートの塩化物イオン浸透性状に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.477-478, 2006.09
- 4) 高橋英孝, 湯浅昇, 松井勇, 笠井芳夫: 温度の違いがコンクリートの塩化物イオン浸透性に及ぼす影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1295-1296, 2010.09
- 5) 小池賢太郎, 山口明伸, 武若耕司, 福重耕平, 移流拡散方程式を用いたコンクリート中の塩化物イオン浸透モデルに関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.904-909, 2014