

論文 高温加熱を受けたモルタルの耐久性に及ぼす再養生条件の影響

鈴木 将充^{*1}・ヘンリー マイケル^{*2}・加藤 佳孝^{*3}・勝木 太^{*4}

要旨：火害を受けたモルタルは強度等の性能が低下し、その後水中養生することにより性能が回復すると報告されているが、その詳細な機構は未だ明らかではなく、耐久性能の回復機構に関しては殆ど検討されていない。本研究は、火害後の耐久性能の回復機構を解明するため、透気性及び中性化に着目し、異なる再養生条件下で実験的検討を行った。その結果、火害後に水中養生を施した場合、透気性及び中性化に対する抵抗性が回復することが明らかとなった。

キーワード：火害, 再養生, 耐久性, 透気性, 中性化

1. はじめに

火害を受けたコンクリート構造物は、30～600℃における自由水やセメント水和物の脱水、600～700℃におけるCSH相の分解、1100～1200℃における融解が生じ、これらの性状変化が劣化の主要因とも言われている。最近では、高強度コンクリートが使用されるようになってきており、高強度コンクリートほど爆裂が発生しやすいという問題が懸念されている。爆裂の主な原因として、水蒸気圧説、熱応力説、複合作用説が挙げられているがその原因は未だ明らかとされていない^{1), 2)}。

火害を受けたコンクリート構造物は、まず損傷度を診断し、損傷火害度(被害等級)を判定し、補修・補強あるいは取り壊しの判断を行わなければならない²⁾。ここで、被害程度がかぶりコンクリート部に損傷ありと診断された際、補修として断面修復および表面被覆が必要となる。しかし、Poon³⁾らやHenry⁴⁾らは、火害を受けたコンクリートを水中で再養生することにより、細孔構造が火害を受ける前の状態に戻り、強度も回復すると報告している。この性質を積極的に補修に活用することができれば、労力および材料の浪費を大幅に軽減することができ、低コストかつ低環境負荷型の対策法が実現できると考えられる。

本研究は火災により中程度の被害を生じたコンクリート構造物(爆裂を生じない程度の被害)を対象として、再養生による耐久性の回復を検討した。なお、コンクリートの耐久性として、透気性及び中性化に着目し、再養生におけるモルタルマトリクス of 基本的性状を解明するため供試体はモルタルとした。また、Henry⁵⁾らが提案している、再養生期間中に発生するマイクロクラックおよびマクロクラックの確認と、それらの回復状況の検討も実施した。

2. 実験概要

2.1 実験要因

配合は、普通コンクリートおよび高強度コンクリートを想定したモルタルであり、各々W/C=0.5, S/C=2.3(以下, NSC), W/C=0.3, S/C=1.8(以下, HSC)の2種類である。供試体の寸法は、50φ×100mm シリンダーである。1日後に脱枠し、水中養生を14日間行い、その後、気中養生(20℃, 60%RH)を14日間行った。

本研究における火災とは、爆裂が生じない範囲内で最大の強度低下を生じさせる条件であり、電気炉を用いて供試体を550℃で2時間加熱した。なお、加熱条件は、温度および加熱時間を変化させた事前実験結果に基づいて決定した。

再養生条件は、気中、水中、気中-水中の3種類とし、それぞれ下記の条件で再養生した。気中再養生は、炉から取り出した後、気中(20℃, 60%RH)にて28日間再養生した。水中再養生は、炉から取り出した直後に水中に浸漬し、28日間水中にて再養生した。気中-水中再養生は、炉から取り出した直後1時間は気中(20℃, 60%RH)にて養生し、その後水中に浸漬させ28日間水中にて再養生した。

2.2 試験項目および方法

(1) 蛍光エポキシ樹脂含浸法

表-1に再養生条件別使用供試体を示す。PP3はHSCにポリプロピレン繊維を容積比で0.3%混入したものであり、高温加熱によるポリプロピレン繊維消失後、再養生におけるひび割れの発生・閉塞はHSCとほぼ同様であると考えられるため、HSCを代替するものとして用いた。なお、PP3がHSCの代替として使用可能であることは、水中再養生1時間の結果により判断した。詳細は、実験結果に記す。再養生終了後から蛍光エポキシ含浸までの

*1 芝浦工業大学大学院 工学研究科 建設工学専攻 (正会員)

*2 東京大学大学院 工学系研究科 社会基盤学専攻 修(工) (正会員)

*3 東京大学 生産技術研究所 准教授 博(工) (正会員)

*4 芝浦工業大学 工学部土木工学科 教授 工博 (正会員)

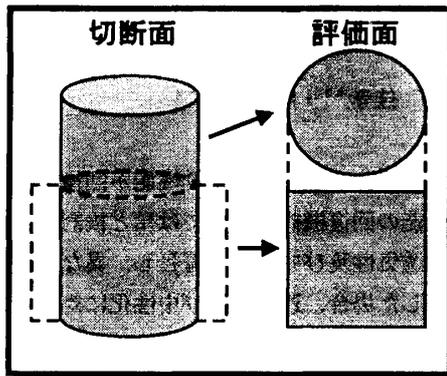


図-1 供試体切断面と評価面

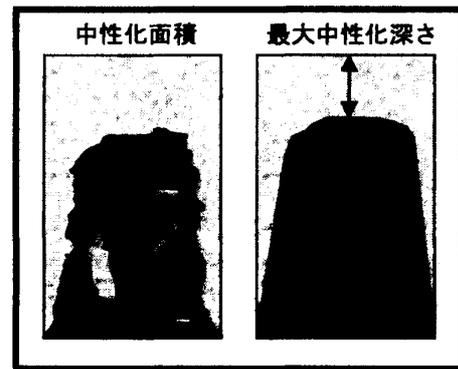


図-2 中性化面積および最大中性化深さ

期間の水和を停止させるため、供試体を乾燥(40℃)させた。蛍光エポキシ樹脂の供試体への真空含浸には、容量約 70ℓの真空の真空チャンパーと実効排気速度 60ℓ/min、到達圧力 9.3Pa の真空ポンプを用いた。蛍光エポキシ樹脂は、補修用の超低粘度エポキシ樹脂(粘度：120mPa・s at 20℃)に、質量比で 0.75%の蛍光染料(黄 1：白 2)を溶解させたものを用いた。蛍光エポキシ樹脂を供試体に真空含浸させ、硬化した後に評価面を切断・研磨した。図-1 に供試体切断面と評価面を示す。評価面に紫外線強度 2000μW/cm²(L=500mm)の紫外線探傷灯を用いて紫外線を照射し、ひび割れを可視化することにより評価・観察した⁶⁾。

(2) 圧縮強度試験

表-2 に再養生条件・測定時期・使用供試体を示す。

(3) 透気試験

表-2 に再養生条件・測定時期・使用供試体を示す。

再養生終了後、供試体を炉乾燥(40℃)にて脱水し、ドライカッターで切断し厚さ 4cm 程度に成形した。測定時は、成形した供試体の側面をシーリングし、ゴムシリンダーにはめ込み、透気セルに設置した。その後、透気セルに圧縮空気を注入し、試験体内部を透過した空気流量が定常となったことを確認した上で、メスシリンダーを利用した水中置換法により透気量を測定した。透気係数は測定した透気量の結果から式(1)より求めた⁷⁾。

$$K = \frac{2 P_2 h r}{P_1^2 - P_2^2} \cdot \frac{Q}{A} \quad (1)$$

ここに、K：透気係数(cm/s)、P₁：載荷圧力(N/mm²)

P₂：大気圧(N/mm²)、h：供試体の厚さ(cm)、Q：

透気量(cm²/s)、A：透気面積(19.63cm²)、r：気体

の単位体積重量(空気：1.205×10⁻⁶ N/mm³)

(4) 中性化促進試験

表-3 に設定した条件を示す。条件として示した水中養生とは、材齢 28 日において高温加熱を受けさせず、更に 28 日間水中養生を施した供試体を示す。これによ

表-1 再養生条件別使用供試体

再養生\期間	1 時間	7 日間
水中(W)	NSC,HSC,PP3	NSC,HSC
気中(A)	×	NSC,HSC
気中-水中(A-W)	PP3	PP3
NSC(W/C=0.5)		HSC(W/C=0.3)
PP3(W/C=0.3 ポリプロピレン繊維混入率 0.3%)		

表-2 再養生条件・測定時期・使用供試体

再養生	測定時期	使用供試体
水中(W)	加熱前、加熱 1 時間後、 3 日後、28 日後	NSC HSC
気中(A)		
気中-水中(A-W)		

表-3 設定条件と詳細

条件名	詳細
加熱前	高温加熱を受けていない状態
加熱後	高温加熱を受けた状態
水中養生	高温加熱を受けていない状態で再養生(W)と同じ 28 日間水中養生
再養生(W)	高温加熱後、28 日間水中で再養生
再養生(A-W)	高温加熱後、1 時間気中養生した後、28 日間水中で再養生

り、未水和セメントの水和の影響が確認でき、高温加熱後水中で 28 日間再養生する供試体と同一条件下で比較できるものと考えた。養生終了後、供試体は、温度 20±2℃、60±5%RH、CO₂ 濃度 5±0.2%に設定した中性化促進試験機に移動し、促進期間 0 週・1 週・4 週・8 週においてフェノールフタレイン法によりノギスで中性化深さを測定した。中性化域が複雑な場合(図-2 左)、画像解析を用いて中性化面積を算出し、四辺から一様に進

行したと置き換え、中性化面積および健全全部面積から平均中性化深さを算出した。また、最も中性化が進行する供試体上面からの最大中性化深さ(図-2 右)を測定することにより、最も高温加熱の影響が大きい箇所と全体的な中性化進行を比較した。

3. 実験結果

3.1 断面観察

写真-1 に蛍光エポキシ樹脂含浸後の画像を示す。可視光画像では、エポキシ樹脂の浸透程度が確認できない。一方、紫外線を照射すると、可視光では確認することができなかったエポキシ樹脂が緑色に発色し、浸透範囲を可視化することができる(写真-2)。供試体はNSCの7日間気中再養生であり、表面にひび割れが発生していた。そのひび割れからエポキシ樹脂が浸入し、広範囲にわたって浸透しているのが確認できる。また、HSCの7日間気中再養生は、NSCほど深くは浸透しないが同様の傾向を確認している。写真-3 に HSC-W-1hour の紫外線照射画像を示す。供試体表面からマイクロクラックが発生し幾重にも重なり合って内部に進展しているのが確認された。写真-4 に HSC-W-7days の紫外線照射画像を示すが、写真-3 で示した HSC-W-1hour において確認された微細ひび割れが、ほとんど見られない。これにより、水中で再養生することによりマイクロクラックは閉塞すると考えられる。写真-5 に PP3-W-1hour の紫外線照射画像を示す。高温加熱によりポリプロピレン繊維が消失したことにより空隙が発生し、その空隙にエポキシ樹脂が充填されている状況が確認できる。しかし、それ以外は写真-3 に示した HSC-W-1hour と同様の性状を示しており、HSC の代替として使用できると判断した。写真-6 に PP3-A-W-1hour の紫外線照射画像を示す。火害後水中で1時間再養生した供試体とは違い、表面から層状にエポキシ樹脂が浸透し全体的に多孔質化していることが確認された。写真-7 に PP3-A-W-7days の紫外線照射画像を示す。写真-4 に示した HSC-W-7days 同様、エポキシ樹脂の浸透は確認されなかった。これらの結果から、高温加熱後、表面から内部にマイクロクラックの発生や層状に多孔質化しても、水中で再養生することにより緻密化し閉塞する可能性があると考えられる。



写真-1 NSC-A-7days 可視光

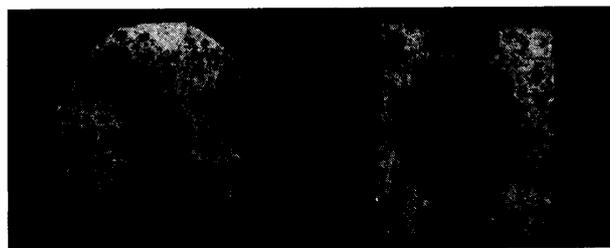


写真-2 NSC-A-7days 紫外線照射

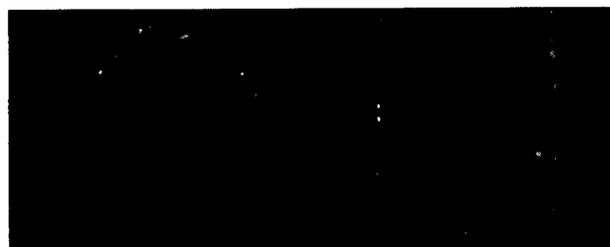


写真-3 HSC-W-1hour 紫外線照射

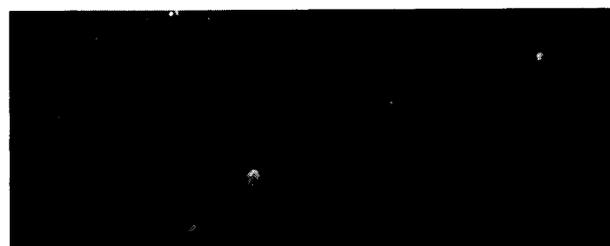


写真-4 HSC-W-7days 紫外線照射



写真-5 PP3-W-1hour 紫外線照射



写真-6 PP3-A-W-1hour 紫外線照射

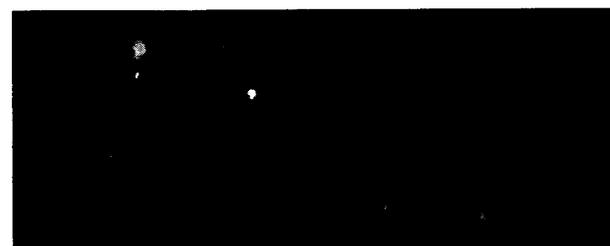


写真-7 PP3-A-W-7days 紫外線照射

3.2 圧縮強度試験

図-3にNSCの再養生条件における残存圧縮強度割合を示す。気中再養生では、再養生材齢の経過とともに圧縮強度が低下しており、再養生材齢28日において32%程度まで低下した。水中再養生では、加熱1時間後において大幅に強度が低下するが、その後、再養生材齢の経過とともに回復し、最終的に再養生材齢28日においては60%程度まで回復した。気中-水中再養生では、水中養生に移行してからは順調に回復し続け、再養生材齢28日において75%程度まで回復した。

図-4にHSCの再養生条件における残存圧縮強度割合を示す。それぞれの再養生条件においてNSCと同様の挙動を示した。しかし、再養生材齢28日における残存圧縮強度割合は、気中再養生51%程度、水中再養生70%程度、気中-水中再養生80%程度とNSCと比較して高い回復率を示す結果が得られた。

Henryら⁹⁾は、再養生条件の違いによる圧縮強度の低下に関して、以下のように考察している。高温加熱直後に水中で再養生する場合、急激な温度変化によってマイクロクラックが発生し強度が低下する。一方、気中で再養生した場合、水中の場合と比較して供試体の温度は緩やかに低下していくが、供試体内部と表面の間に温度勾配が生じ、これによってマクロクラックが発生・進行するため、気中再養生期間中、強度は低下し続ける。本研究においても、同様な強度低下の挙動が確認できる。また、マイクロおよびマクロクラックの存在は、それぞれ写真-3と、写真-2にて確認することができ、既往の研究で提案された強度低下機構の妥当性が検証されたと考えられる。

3.3 透気試験

図-5にNSCの再養生条件における透気係数を示す。気中再養生では、前述したマイクロクラックが発生・進行するため再養生材齢の経過とともに透気係数が大きくなる。特に、再養生材齢28日においては、他の再養生条件と比較して非常に透気係数が大きくなる結果が得られた。水中再養生では、加熱1時間後、透気係数は大きくなり、再養生材齢の経過とともに僅かながら透気係数が大きくなる挙動を示した。気中-水中再養生では、水中再養生と同様、加熱1時間後以降、僅かに透気係数は大きくなる。NSCは水中で再養生しても回復せず、少しずつ透気係数が大きくなっていく結果が得られた。

図-6にHSCの再養生条件における透気係数を示す。気中再養生では、高温加熱1時間後に透気係数が大きくなり、NSCと同様に、再養生材齢28日で大幅に大きくなる挙動を示した。水中再養生では、高温加熱1時間後に透気係数は大幅に大きくなるが、以降、再養生材齢の経過とともに小さくなり、回復する挙動を示した。気中

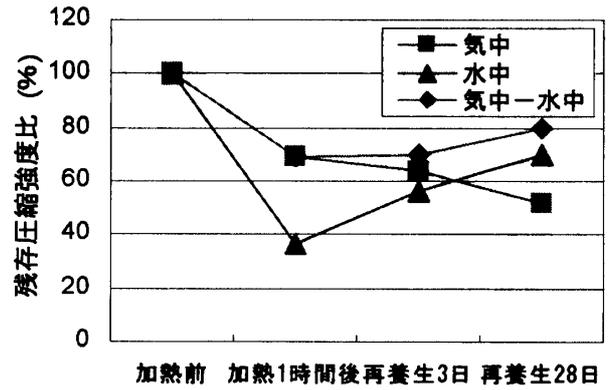


図-3 再養生条件における残存圧縮強度比(NSC)

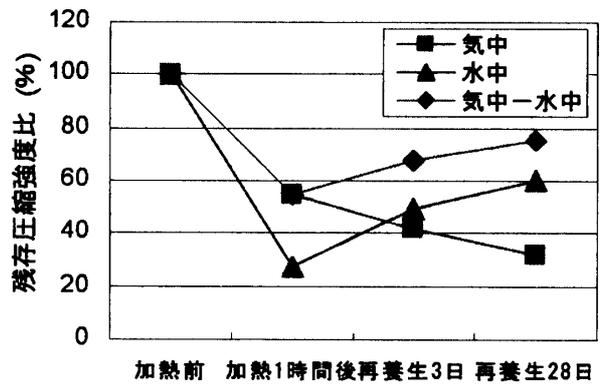


図-4 再養生条件における残存圧縮強度比(HSC)

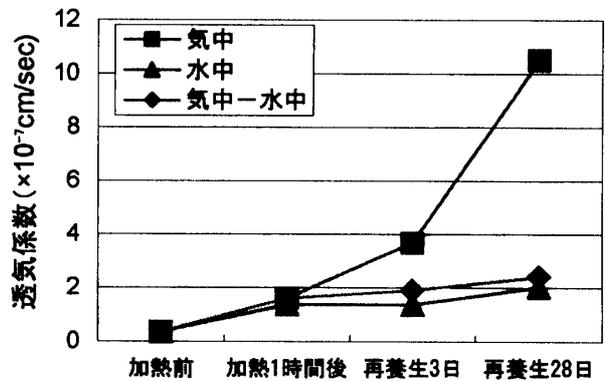


図-5 再養生条件における透気係数(NSC)

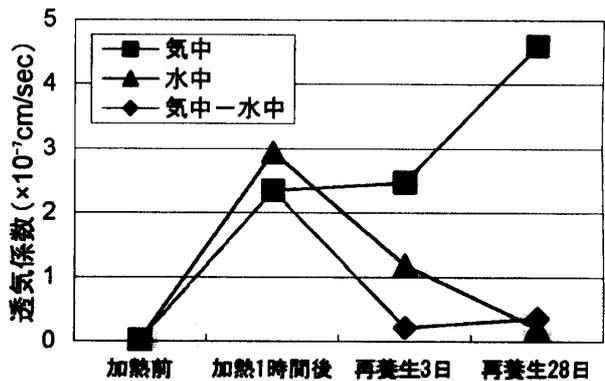


図-6 再養生条件における透気係数(HSC)

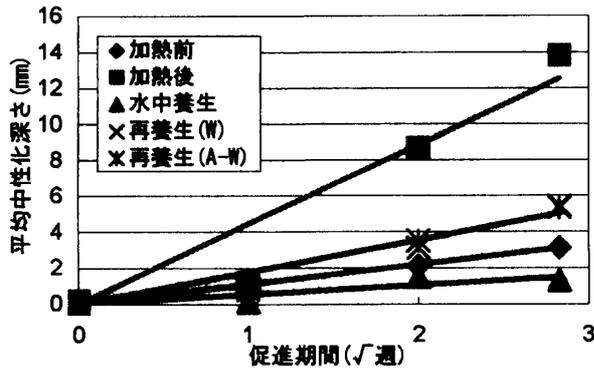


図-7 平均中性化深さの経時変化(NSC)

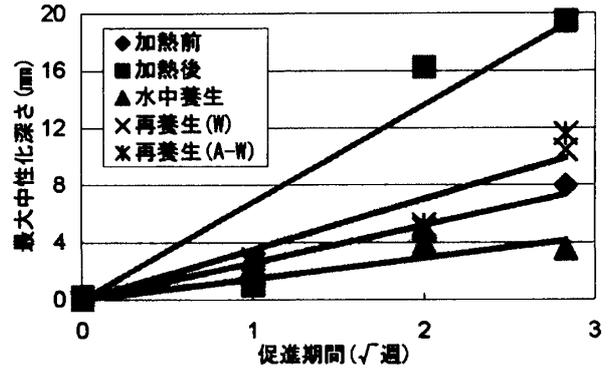


図-8 最大中性化深さの経時変化(NSC)

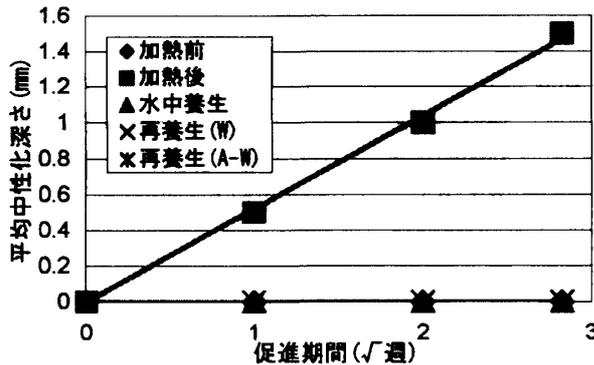


図-9 平均中性化深さの経時変化(HSC)

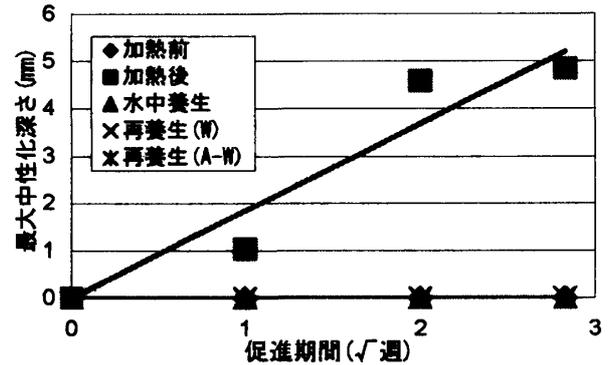


図-10 最大中性化深さの経時変化(HSC)

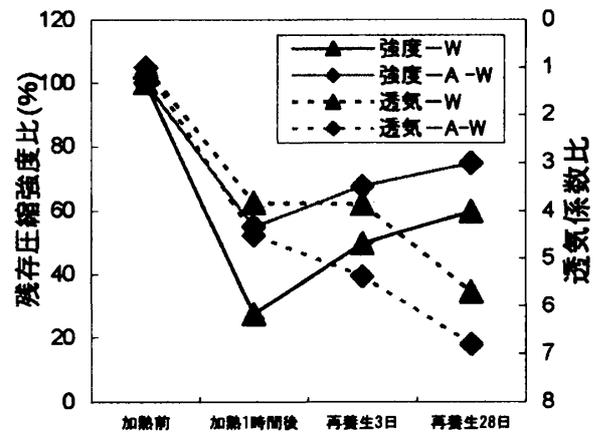


図-11 圧縮強度と透気性の比較(NSC)

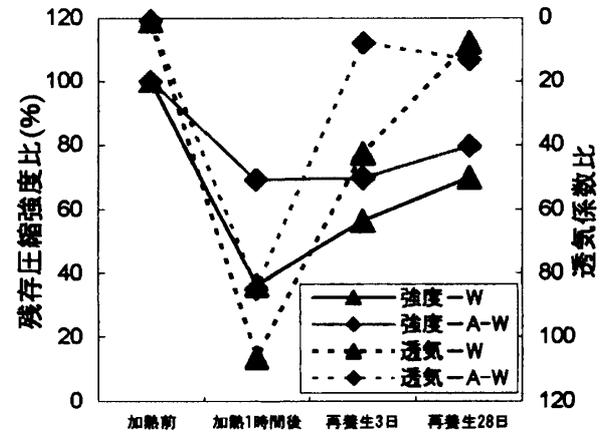


図-12 圧縮強度と透気性の比較(HSC)

水中再養生では、高温加熱1時間後に透気係数が大幅に大きくなるが、再養生材齢3日には小さくなり回復していることがわかる。これにより、HSCは水中で再養生することにより透気性は回復すると考えられる。

3.4 中性化促進試験

図-7にNSCの平均中性化深さの経時変化を示す。加熱前と加熱後と比較すると、加熱前の中性化速度は比較的遅いが、加熱後の中性化速度は格段に速くなっている。図-8に示すNSCの最大中性化深さの経時変化は、図-7の中性化速度が全体的に上方に移動した様な挙動を示すが、全体としては同様な傾向を示していることが分か

る。以上の結果から、高温加熱後に水中再養生および水中-水中再養生を施すことにより、水中再養生ほど中性化抵抗性は高くないが、再養生しない場合と比較して、格段に中性化抵抗性を向上させることができる。

図-9にHSCの平均中性化深さの経時変化を示す。加熱前と加熱後と比較すると、加熱前は全く中性化が進行しないが、加熱後はNSCに比較して約1/10の速度ではあるが、進行していく様子が確認できる。水中養生と再養生(W)・(A-W)を比較すると、促進材齢8週においても全く中性化は進行しない結果が得られた。図-10に示すHSCの最大中性化深さの経時変化からも、ほぼ同様な

結果が得られた。以上の結果から、高温加熱後の中性化は進行するが、水中再養生および気中-水中再養生を施すことにより、中性化の進行を抑制できることが分かった。

3.5 実験結果から得られた考察

図-11にNSC、図-12にHSCの圧縮強度と透気性の比較を示す。それぞれの試験で効果が得られた水中再養生(W)と気中-水中再養生(A-W)の結果のみを再掲している。なお、透気係数は比較し易いように、加熱前の透気係数に対する比とし、さらに軸を反転している。なお、透気性の低下とは、透気係数の増加(透気係数比の増加)を意味する。NSCは、加熱1時間後は両者とも大幅に低下するが、それ以降、圧縮強度は回復する挙動を示すが、透気性は低下する挙動を示した。HSCは、加熱1時間後は同様に両者とも大幅に低下するが、それ以降は回復している。これらから、再養生における圧縮強度および透気性は必ずしも同様な傾向を示さない可能性があることが分かった。この原因として、試験サンプルの違い(圧縮試験は供試体全体に対し透気試験は被害が大きい上部のみ使用)、透気性に大きく影響する細孔構造の変化、計測できなかった要因の存在等が推察されるが、本研究では解明するには至らず、今後の検討課題である。

透気係数と中性化の進行を比較すると、ほぼ同様な傾向を示していることが分かる。透気性の回復が見られなかった気中再養生は、NSC、HSCともに中性化の進行が他の条件と比べて極めて速く(図中高温加熱後)、透気性が回復するHSCの再養生(W)、再養生(A-W)は、ほとんど中性化が進行していない。これらのことから、高温加熱を受けて再養生したモルタルの中性化進行は、基本的には気体の移動に支配されており、中性化の反応を支配する水酸化カルシウムの状況等の化学的な影響は、顕著に受けていないと推察されるが、化学的な検討に関しては今後の課題とする。

4. まとめ

本研究では、火災によって中程度の被害を受けたコンクリート構造物を対象として、再養生による物理的な性状変化を実験的に検討した。本研究で得られた知見を以下に示す。

- 1) 蛍光エポキシ樹脂含浸法を用いて断面観察することにより、マイクロクラックおよびマクロクラックの存在を確認することができ、既往の研究で提案された強度低下機構の妥当性が検証された。
- 2) 再養生における圧縮強度および透気性は同様な傾向を示さないことが分かった。この原因として、試験サンプルの違い、細孔構造の変化、計測できなかった各種要因等が推察されるが、解明するまでには

至らず今後の課題である。

- 3) 透気性と中性化は強い相関関係にあり、水中再養生を施すことにより透気性および中性化に対する抵抗性が回復することが分かった。このことから、火害後の劣化の中で透気性および中性化に対して、水中再養生を施すことにより耐久性は回復すると考えられた。

本研究は、物理的観点から検討しているが、得られる結果は結果論でしかなく、その過程を知るには化学的観点から検討する必要がある。今後は、再養生による化学的な性状変化を検討したいと考えている。

謝辞： 蛍光エポキシ樹脂含浸試験の実施にあたり、飛鳥建設技術研究所平間昭信氏に、研究実施において研究室各位の協力を得た。ここに記して、感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 社団法人 日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物の火災安全性研究委員会報告書，社団法人日本コンクリート工学協会，2002.6.
- 2) 土木学会：コンクリート構造物の耐火技術研究小委員会報告ならびにシンポジウム論文集，土木学会，2004.10.
- 3) Poon, C.S., Azhar, S., Anson, M., Wong, Y.L., : strength and durability recovery of fire-damaged concrete after post-fire-curing, *Cement and Concrete Research* 31, pp.1307-1318, 2001.
- 4) Henry, M., Ahn, T.H., Kato, Y. and Kishi, T.: Evaluation of re-curing for the recovery of high-strength mortar exposed to fire, *コンクリート工学年次論文集*, 2008. (投稿中)
- 5) Henry, M. and Kato, Y.: Influence of re-curing condition on damage and recovery of mortar exposed to fire, *Proceedings of the 6th International Symposium on New Technologies for Urban Safety of Mega Cities in Asia*, 2007.
- 6) 岩城圭介, 加藤淳司, 平間昭信, 塩谷智基: 微視的断面観察による酸劣化したコンクリートの微細構造の評価, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.26, No.1, pp.999-1004, 2004.
- 7) 金武漢ほか: モルタル及びコンクリートの中性化に及ぼす透気係数に関する実験的研究, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.22, No.1, pp.193-198, 2000.