

論文 火災損傷を受けた普通コンクリートの物質侵入抵抗性の評価と補修方法に関する基礎研究

若林 瑠美*1・小澤 満津雄*2・迫井 裕樹*3・川邊 清伸*4

要旨: 本研究では、普通強度コンクリートを対象として、火害後の物質侵入抵抗性を検討した。すなわち、加熱後の円柱供試体を対象として塩水浸せき試験を実施した。加えて、表面含浸材の有無が物質侵入抵抗性に与える影響を検討した。また、平板供試体を対象として、加熱前後での透気試験と超音波試験を実施した。その結果、加熱温度が高くなるほど、硝酸銀溶液噴霧によって白色に呈色した面積が増加し、塩化物浸透深さが大きくなることを確認できた。透気係数と透気深さは加熱温度が大きくなると、大きくなった。特に、透気深さは熱損傷を受けた部材内部の深さ方向の損傷程度を評価できる可能性がある。

キーワード: 火害, 表面含浸材, 塩水浸せき試験, 硝酸銀溶液, 物質侵入抵抗性, 超音波, 透気試験

1. はじめに

火災を受けたコンクリート構造物は、加熱表面が損傷し、耐久性上問題となる。火害を受けるとコンクリート内部の水和生成物は熱分解し、ひび割れが生じることがある。上記の劣化現象により、物質侵入抵抗性や見かけ密度の低下に繋がると考えられる。物質侵入抵抗性が低下すると、コンクリート表面から CO₂ が侵入しコンクリートの中性化が進行する。加えて、塩化物イオンの侵入によりコンクリート内部の鉄筋を腐食させる危険性がある。その結果、鉄筋コンクリート構造物の耐久性は低下し、部材としての力学性能も低下する可能性がある。そのため、火害を受けたコンクリートの物質侵入抵抗性の評価は非常に重要である。本研究グループにおいても、火害を受けた高強度コンクリートの物質侵入抵抗性の評価方法について検討を進めてきた¹⁾²⁾³⁾。すなわち、加熱したコンクリート供試体の塩水浸せき試験を実施し、供試体を割裂後に硝酸銀溶液を噴霧し、析出する塩化銀より塩分浸透状況を検討している。その結果、加熱温度が高くなると、塩分浸透深さは大きくなることわかった。ここでの塩分は、トレーサとして使用している。一方、普通強度コンクリートについては、火害後の物質侵入抵抗性について検討した事例は少ないのが現状である。更に、火災損傷を受けたコンクリートに対して表面含浸材⁴⁾⁵⁾を適用し、効果を検討した報告も少ないのが現状である。

そこで、本研究では、水セメント比（以下,W/C）が0.63の普通強度コンクリートを対象として、火害後の物質侵入抵抗性を検討した。すなわち、加熱後の円柱供試体を対象として塩水浸せき試験と硝酸銀溶液噴霧試験

を実施した。加えて、表面含浸材の有無が物質侵入抵抗性に与える影響を検討するために、ケイ酸塩系表面含浸材およびケイ酸塩系表面含浸材に撥水材を加えたものについても検討を行った。また、コンクリート平板供試体を対象として、加熱前後での透気試験(Torrent 法⁶⁾)と超音波試験を実施した。透気試験はコンクリートの表層部の品質評価や凍害の評価に用いられている⁷⁾⁸⁾。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

本研究で使用したコンクリートの示方配合を表-1に示す。W/Cは0.63とし、セメントは早強ポルトランドセメントを使用した。粗骨材は輝緑凝灰岩（密度：2.85g/cm³）を使用した。粗骨材の最大寸法20mmとした。混和材はAE減水剤を用いた。表-2にコンクリートのフレッシュ性状(スランプ, 空気量, 練り上り温度)および材齢75日の力学特性(圧縮強度, 引張強度, 弾性

表-1 使用したコンクリートの示方配合

水セメント比 %	単位量(kg/m ³)				
	水 W	セメントC	細骨材 S	粗骨材 G	AE減水剤
63	170	270	769	1176	4.05

表-2 フレッシュ性状と力学特性

空気量 %	スランプ cm	温度 ℃	圧縮強度 MPa	弾性係数 GPa	引張強度 MPa
4.8	9.8	27.9	45.2	33.0	3.4

*1 群馬大学 工学部社会環境デザイン工学科 学生 (学生会員)

*2 群馬大学 理工学部環境創生理工学科 准教授 (正会員)

*3 八戸工業大学 土木建築工学科 講師 (正会員)

*4 八戸工業大学大学院 土木工学専攻 学生 (学生会員)

係数)を示す。表面含浸材は、ケイ酸塩系表面含浸材と、副成分として撥水性を付与したケイ酸塩系表面含浸材の2種類を使用した。

2.2 塩水浸せき試験による物質侵入抵抗性の評価

実験フローを図-1に示す。この試験の位置づけは材料試験である。供試体はφ100mm×L200mmの円柱とした。まず、コンクリート供試体を作製し、その後、翌日に脱枠を行い、2.5か月間温度20℃の水中で養生を行った。養生後、加熱試験を実施した。加熱試験の設定温度は、加熱なしと100、200、300℃の4水準とした。加熱試験には電気炉(内寸:幅300mm、高さ160mm、奥行き260mm)を用いて、円柱供試体2体ずつ加熱を行った。加熱試験方法はRILEM試験⁹⁾に準拠し、電気炉内の温度上昇速度は1℃/minとした。電気炉内の温度が設定温度に達した後、設定温度を5時間保持し、その後自然冷却を行った。供試体中心部に熱電対を配置した供試体を作製し、加熱時に内部温度を確認した。各設定温度で加熱前後の質量を測定し、質量減少率を測定した。供試体数は各設定温度で5本とした。加熱試験後、コンクリートカッターを用いて円柱供試体を高さ100mmに切断し、上下面をエポキシ樹脂でシールした。各設定温度あたり、(a)含浸材無4体、(b)ケイ酸塩系表面含浸材を塗布した(含浸材有)4体、(c)副成分として撥水性を付与したケイ酸塩系表面含浸材を塗布した(含浸材+撥水)4体、計48体を作製した。作製した供試体をNaCl濃度10%の塩水に28日間浸せきした。塩水浸せき後の供試体に対して割裂引張試験を行った。割裂した供試体について、割裂面に硝酸銀溶液(0.1mol/l)を噴霧した。白色を呈した部分は塩化銀が生成した領域とし、塩化物量浸透深さと定義した。供試体側面(加熱面)から白色を呈した領域をノギスによって測定した。

2.3 非破壊試験による加熱を受けたコンクリートの性能評価

実験フローを図-2に示す。供試体は、400×400×100mmの平板とした。供試体の寸法は小さいが、一面加熱による部材試験と考えている。供試体内部の温度を計測するために、中央部の加熱面から深さ5、15、30mmの位置に熱電対を設置した。実験因子は、加熱条件によって、加熱なしと200℃および300℃とし、設定温度毎に1体ずつ作製した。コンクリートの配合と養生条件は2.1.2.2と同様とした。供試体底面の中央(300×250mm)を加熱面とした。加熱試験には、電気炉(内寸:幅300mm、高さ250mm、奥行き400mm)を用いた。電気炉の開口部に供試体を設置し、非加熱面は断熱ブランケット材で覆い熱の放射を極力防いだ。加熱の様子を図-3に示す。加熱条件は2.2項と同様とした。加熱試験後に超音波伝播速度と透気試験を実施した。図-4に測定位置を示す。

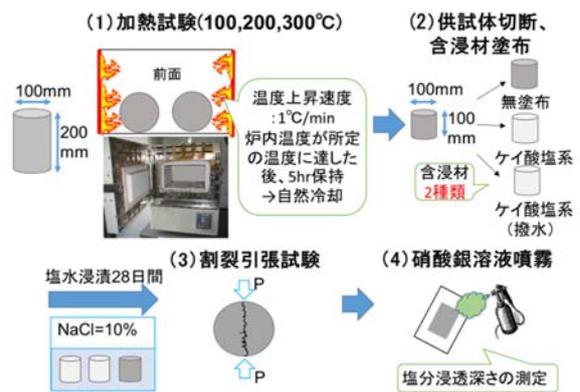


図-1 実験フロー (物質侵入抵抗性の評価)

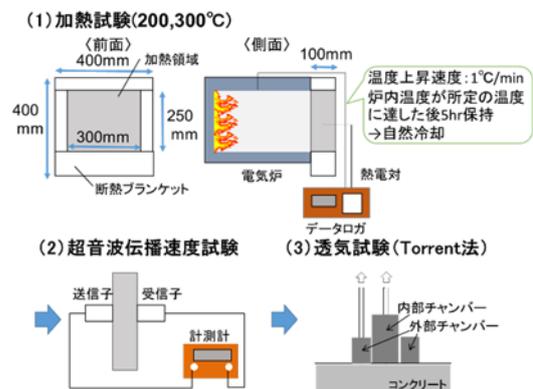


図-2 実験フロー (非破壊試験による性能評価)



図-3 平板供試体加熱の様子

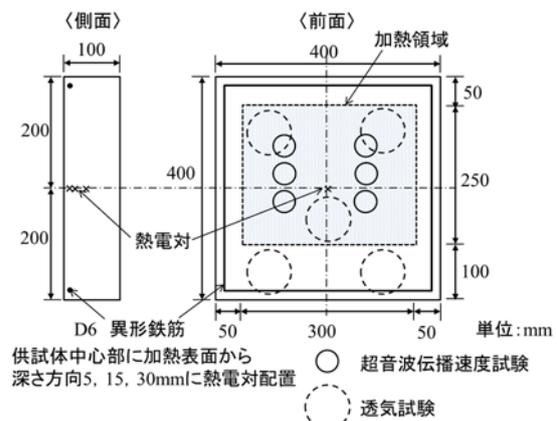


図-4 超音波伝播速度および透気試験測定位置

超音波伝播速度の測定は、透過法¹⁰⁾を用いた。加熱領域において、各供試体あたり6点測定した。打設面(加熱面の裏面)においては凹凸をなくするためにサンダーを用いて削り、平滑にしてから測定を行った。伝播時間は発・受信子の接触時間5~10秒中の最小値を読み取った。各測点の伝播時間平均値を供試体高さ(100mm)で除して伝播速度を算出した。

透気試験は、Torrent法を用いた。Torrent法はコンクリート表層の透気性を評価する手法のうち表面法に属する。コンクリート表面に減圧したチャンバーを設置し、その内部の気圧変化から透気係数を算出するものである。測定箇所は加熱領域を4箇所、非加熱領域を2箇所とした。Torrent試験における透気係数と透気深さの算出方法を式(1)~(3)に示す。

$$Kt = \left(\frac{V_c}{A}\right)^2 \frac{\mu}{2\varepsilon Pa} \left[\frac{\log\left(\frac{Pa+\Delta P}{Pa-\Delta P}\right)}{\sqrt{tf}-\sqrt{t0}}\right]^2 \quad (1)$$

$$\Delta P = Pf - P0 \quad (2)$$

$$L = \left(\frac{2Kt \cdot Pa \cdot tf}{\varepsilon \cdot \mu}\right)^{0.5} \quad (3)$$

Kt : 透気係数(m²), L : 透気深さ(m), V_c : 内側チャンバーの体積(m³), A : 内側チャンバーの断面積(m²), $P0$: 減圧終了時の圧力(N/m²), Pa : 大気圧(N/m²), Pf : 測定終了時の圧力(N/m²), tf : 測定終了時間(s), $t0$: 測定開始時間=60(s), ε : 空隙率=0.15, μ : 空気粘性(N·s/m²)

3. 実験結果および考察

3.1 塩水浸せき試験による物質侵入抵抗性の評価

(1) 供試体内部の温度履歴

図-5~7に、設定温度100℃と200℃および300℃における炉内温度と供試体内部温度の経時変化を示す。図より、設定温度100℃と200℃および300℃の供試体中心部の最高温度は89.6℃と181.5℃および303.2℃であった。加熱試験後、供試体を割裂し、熱電対の位置を確認したところ、100、200℃は中心部に配置してあることを確認した。300℃は加熱表面から30mmの位置にずれていることを確認した。設定温度100℃と200℃では、供試体の中心温度が最高となった時点で、炉内温度と中心温度の温度差が10~25℃程度であることがわかる。

(2) 質量減少率

図-8に加熱前後の質量減少率を示す。加熱温度100、200℃では供試体のひび割れを目視では確認できなかった。一方、加熱温度300℃では、亀甲状のひび割れを目視で確認した。

(3) 割裂引張強度と加熱温度の関係

図-9に割裂引張強度と加熱温度との関係を示す。供試体は塩水浸せき試験後の供試体を対象とした。加熱無

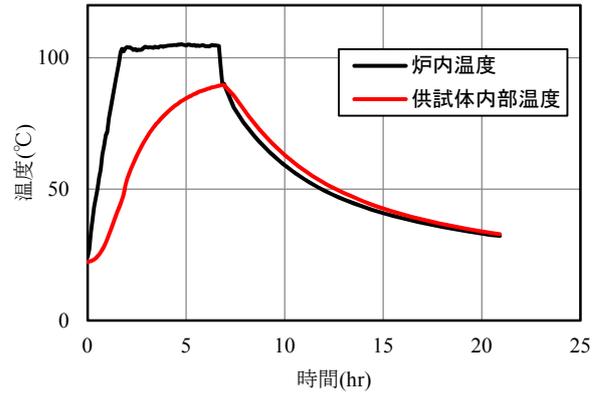


図-5 炉内温度と供試体内部温度の経時変化(100℃)

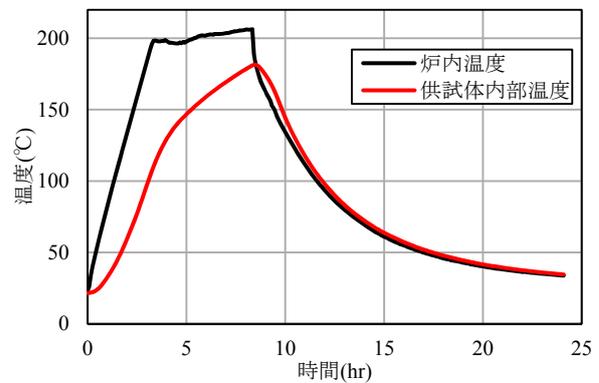


図-6 炉内温度と供試体内部温度の経時変化(200℃)

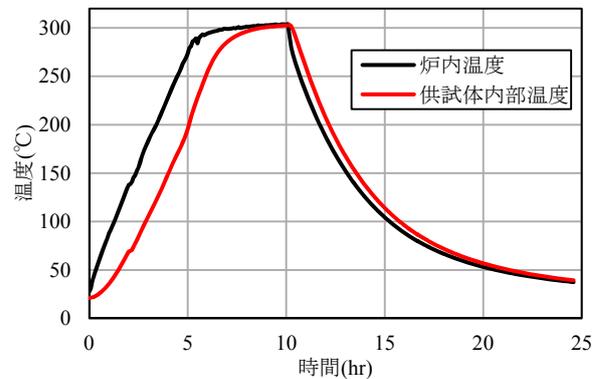


図-7 炉内温度と供試体内部温度の経時変化(300℃)

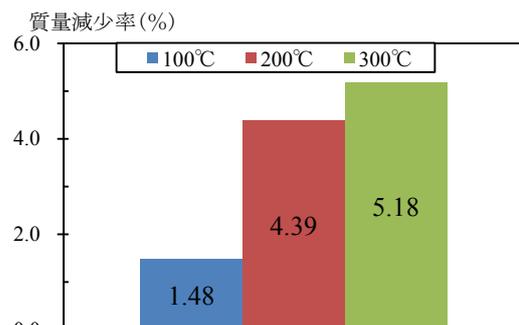


図-8 質量減少率

しの引張強度は、3.4MPa 程度であったが、加熱に伴い引張強度は低下し、300℃で 2.5MPa 程度であった。次に、図-10 に引張強度残存率と加熱温度との関係を示す。加熱無を基準とした引張強度残存率は加熱とともに低下した。以上より、加熱に伴いコンクリート内部が損傷し、強度低下を生じていることがわかる。

(4) 塩化物浸透深さ

図-11 に割裂面の硝酸銀溶液噴霧試験後の塩化物量浸透状況を示す。白色に呈色した領域は塩化銀が生成した領域であり、塩化物の浸透している領域を示す。図より、加熱温度が高くなるほど、白色に呈色した面積が増加し、塩化物浸透深さが大きくなることが確認できた。次に、図-12 に塩化物量浸透深さと加熱温度との関係を示す。本実験では、φ100mm×L100mm の円柱供試体を用いた。上下面はエポキシ樹脂を塗布しているため、側面を塩水暴露面としている。従って、浸透深さの最大値は供試体直径の 1/2 (=50mm) となる。図より、加熱無しでは(a)含浸材無と(b)含浸材有および(c)含浸材+撥水の塩分浸透深さは、それぞれ 15mm と 13mm および 3mm 程度であった。加熱無しでは(c)含浸材+撥水の効果が高いことがわかる。100℃においては、(a)含浸材無と(b)含浸材有および(c)含浸材+撥水の塩分浸透深さは、それぞれ 25mm と 20mm および 6mm 程度であった。一方、200℃と 300℃加熱においては、いずれの種類においても割裂面全面で白色が確認され、塩分浸透を抑制することができなかった。

次に、白色限界領域における塩化物量の推定を試みた。青木ら¹¹⁾は、水セメント比の異なるモルタルを対象として、塩水浸せき試験を実施し、0.1mol/l の硝酸銀溶液の噴霧により白色限界領域の塩化物量の検討を行っている。その結果、白色限界領域の全塩化物量は、W/C が高くなるほど低くなると報告している。また、白色限界位置の全塩化物量と W/C の関係はほぼ線形となり、その傾きは細骨材率が低くなるほど急になるものの、一般的な細骨材率の範囲では大きな差にならないことも報告している。式(4)に塩化物量 Cl(kg/m³)と W/C の関係を示す。

$$Cl = -15.15 \left(\frac{W}{C} \right) + 11.35 \quad (4)$$

本研究で対象としたコンクリートの W/C は 0.63 であるので、青木らの報告より、加熱無し供試体の白色限界領域における塩化物を推定すると Cl は約 1.8kg/m³ となった。加熱を受けると塩化物浸透深さが増加することから、200℃以上加熱すると少なくとも約 1.8kg/m³ 以上の塩化物が供試体全体に浸透していると推定される。白色限界領域の塩化物量を推定することで、加熱に伴う物質侵入抵抗性を評価することが可能であると考える。今後

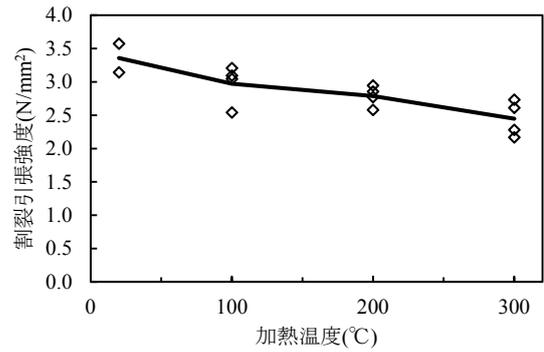


図-9 割裂引張強度

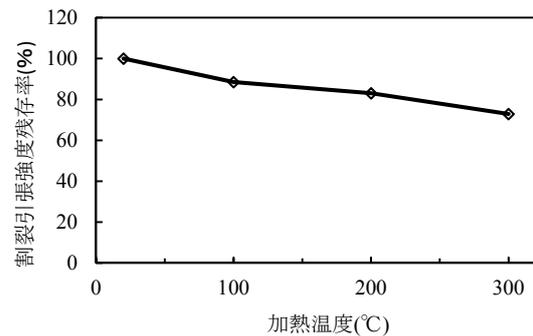


図-10 割裂引張強度残存率

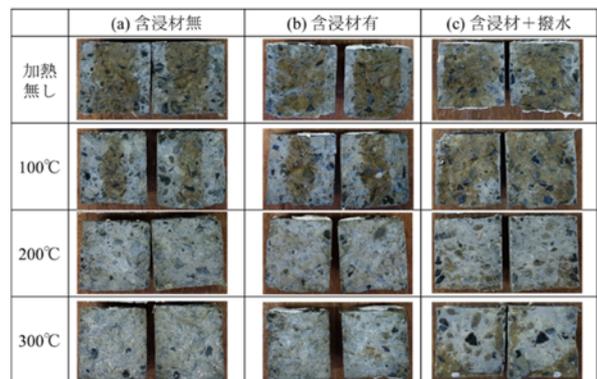


図-11 塩化物イオン浸透深さ状況

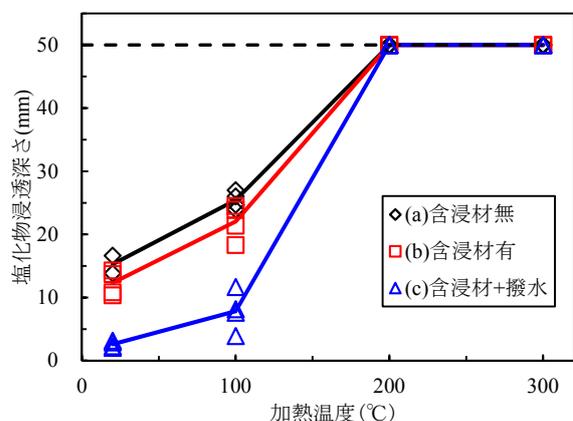


図-12 塩化物イオン浸透深さ

は、加熱温度をパラメータとして白色限界領域の塩化物と W/C の関係を検討する必要があると考える。

3.2 加熱を受けた平板供試体の劣化状況測定試験

(1) 供試体内部の温度履歴

図-13, 14 に炉内温度と加熱表面から 5, 15, 30mm 位置の供試体内部温度の経時変化を示す。加熱温度 200°C の各深さの最高温度は 108, 100, 91°C となった。加熱温度 300°C の各深さの最高温度は 183, 162, 145°C となった。以上より、炉内温度 200°C と 300°C ともに供試体内部に温度勾配が生じた。

(2) 超音波伝播速度試験

図-15 に超音波伝播速度(以下, US)と加熱温度の関係を示す。図より、加熱温度の上昇に伴い、伝播速度は低下しているが、大きな低下は見られなかった。加熱無しを基準とすると、加熱温度 200°C と 300°C において US の低下率は 8, 10% となった。既往の研究¹²⁾では、650°C 程度まで US の大きな低下は見られないという報告がある。

(3) 透気試験

図-16, 17 に Torrent 試験による透気係数と加熱温度の関係および透気深さと加熱温度の関係を示す。加熱領域と非加熱領域の結果を示している。図-16 より、加熱領域の透気係数は加熱温度の上昇に伴い、大きくなっていることがわかる。これは、加熱に伴い、加熱表面付近の水和生成物の分解と微細ひび割れが進展した結果であると考えられる。図-17 より、加熱領域においては透気深さも、透気係数と同様に加熱温度が高くなると深くなる傾向を示した。すなわち、透気深さは加熱に伴う熱損傷深さを検討できる可能性があると考えられる。非加熱領域における透気係数および透気深さは、加熱温度 200°C までは影響が少ない。一方、加熱温度 300°C では、非加熱領域においても、透気係数および透気深さの増加が確認された。加熱温度が 300°C となると、非加熱領域においても熱損傷が生じ、物質侵入抵抗性に影響を及ぼす可能性がある。すなわち、透気試験は加熱領域の

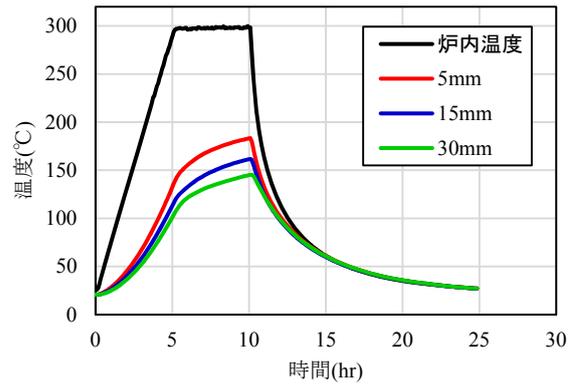


図-14 炉内温度と供試体内部温度の経時変化 (300°C)

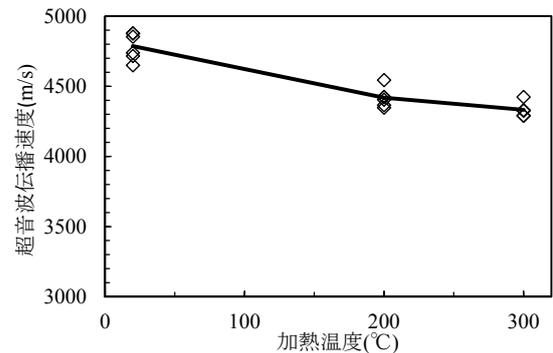


図-15 超音波伝播速度

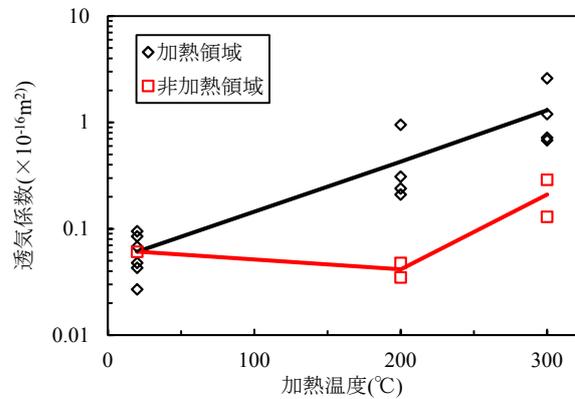


図-16 透気係数

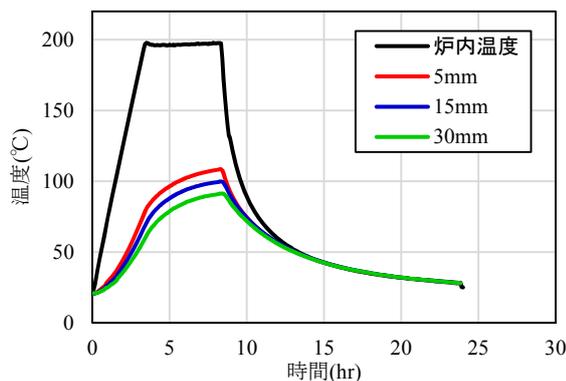


図-13 炉内温度と供試体内部温度の経時変化 (200°C)

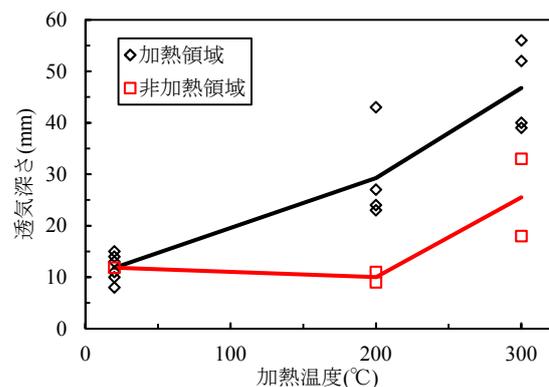


図-17 透気深さ

みならず、加熱による影響範囲を把握する方法の一つになる可能性があると考えられる。

4. 塩化物浸透深さと超音波伝播速度および透気係数の関係

2.2 項では円柱供試体を用いて加熱後の塩化物浸透深さを検討した。塩水浸せき試験では、炉内温度と供試体中心部の最高温度の温度差が 10~25°C程度であった。本試験は材料試験の位置付けであるが、硝酸銀溶液噴霧により局所的な塩化物浸透深さを確認できた。一方、2.3 項において超音波試験と透気試験を実施した。ここでは、部材寸法は小さいが、一面加熱による部材試験として平板供試体の深さ方向に熱損傷を与えた。炉内温度と供試体中心部の最高温度との温度差は 100°C程度であった。超音波計測試験では、加熱に伴う超音波伝播速度の低下に大きな差が見られなかった。これは、部材内部の損傷を平均的に捉えていると考えられる。今回、部材内部の温度勾配があったことも影響しているが、内部の熱損傷の程度が把握しにくい状況にあった。一方、透気試験は、加熱に伴う透気係数の増加や透気深さを局所的にも評価することができた。このことは、透気試験が、熱損傷を受けた部材内部の深さ方向の損傷程度をある程度、評価できる可能性があると考えられる。また、透気試験は加熱領域のみならず、加熱による影響範囲を把握する方法の一つになる可能性があると考えられる。

5. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 普通強度コンクリートを対象として、加熱後の塩水浸せき試験を実施し塩化物量深さを測定した。その結果、加熱温度が高くなるほど、硝酸銀溶液噴霧によって白色に呈色した面積が増加し、塩化物浸透深さが大きくなることが確認できた。
- (2) 表面含浸材と撥水材を用いることで 100°C程度までは塩化物の浸透を抑制することができた。一方、200°Cと 300°Cでは、塩化物浸透の抑制効果はあまりみられなかった。
- (3) 超音波伝播速度は加熱温度の上昇に伴い、低下した。しかし、加熱温度 300°Cまでの範囲では大きな低下は見られなかった。
- (4) 透気係数と透気深さは加熱温度が高くなると、大きくなった。特に、透気深さは熱損傷を受けた部材内部の深さ方向の損傷程度を評価できる可能性がある。また、透気試験は加熱領域のみならず、加熱による影響範囲を把握する方法の一つになる可能性があると考えられる。

参考文献

- 1) 向井佑真, 小澤満津雄, 谷辺徹, 小林孝一: 火災劣化後のコンクリートの物質移動抵抗性に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.1147-1152, 2013.
- 2) 岩本早耶香, 迫井裕樹, 小澤満津雄, 川邊清伸: 火災を受けたコンクリートの物質侵入抵抗性の評価と補修方法に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.820-825, 2014
- 3) 塚越俊, 小澤満津雄: 火災劣化を受けた合成繊維混入型高強度コンクリートの物質侵入抵抗性の評価, コンクリート構造物の造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 第14巻, pp.187-194, 2014, 10
- 4) 坂元貴之, 武若耕司, 山口明神, 樋原弘貴: 各種表面含浸材の塩分浸透および中性化に対する抑制効果, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.1625-1630, 2011
- 5) 土木学会: コンクリートの表面被覆および表面改質技術研究小委員会報告, コンクリート技術シリーズ 68, 2006.4
- 6) R.J.Torrent: A two-chamber vacuum cell for measuring the coefficient of permeability to air of the concrete cover on site, Materials and Structures, pp.358-365, Vol.25, Issue6, July, 1992
- 7) 権代由範, 月永洋一, 阿波稔, 迫井裕樹: 吸引鐘を用いたコンクリートの簡易透気試験法に関する基礎的検討とスケーリング抵抗性評価への適用の試み, 日本建築学会構造系論文集, 第 77 巻, 第 678 号, pp.1193-1202, 2012.8
- 8) 松田啓, 今本啓一, 陣内浩, 清水昭之: マルコフ連鎖モデルと原位置非破壊試験を組み合わせた外壁仕上材料の傾年劣化と躯体保護効果の評価に向けた基礎的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 78 巻, 第 683 号, pp.27-33, 2013.1
- 9) 日本コンクリート工学会: コンクリートの耐火性能に関する研究委員会報告書, 2012.5
- 10) 2012 年制定コンクリート標準示方書 [施工編], 土木学会, pp.212-213, 2013.3
- 11) 青木優介, 嶋野慶次, 三好佑果, 鈴木正志: 硝酸銀溶液噴霧法による硬化コンクリート中への塩化物イオン浸透予測, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1, pp.759-764, 2008
- 12) 小林幸一, 枝広英俊: 火災を受けたコンクリート構造物に対する非破壊・微破壊試験の適用に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 73 巻, 第 629 号, pp.1027-1034, 2008.7