

論文 中性子イメージングを用いた高強度コンクリート内部の脱水に関する研究

小山 拓^{*1}・西尾 悠平^{*2}・伊藤 大介^{*3}・兼松 学^{*4}

要旨: 中性子イメージングを用いてメソスケールの視点から、高強度コンクリートの高温加熱時の脱水について実験的に明らかにすることを目的とした。試験体に使用する高強度コンクリートの粗骨材は硬質砂岩と石灰岩を使用した。結果、水分量が増加している領域の直下に高圧環境が形成されていると予想される領域を観測した。さらに、石灰岩コンクリートは硬質砂岩コンクリートよりも高圧環境が形成されていると予想される領域が試験体深部に形成されていた。よって、高温環境下における水分移動は骨材とマトリックス間に生じる現象の影響を強く受けると考えられる。

キーワード: 高強度コンクリート, 爆裂現象, 高温加熱, 中性子ラジオグラフィ

1. 背景, 目的

コンクリートは一般的に耐火性に優れた材料として知られ、建築基準法で鉄筋コンクリート構造物は一定のかぶり厚を確保できていれば耐火構造物として認められている。しかし、コンクリートは熱の影響による化学的性質、機械的性質が変化し、加熱冷却後においても損傷が残る。また、鉄筋コンクリート構造物が火災を受けると表層部が爆発的に剥離する爆裂現象が発生することが知られている。高強度コンクリートの爆裂現象に関して、JCIで報告書が作成されており、そのなかで、リング試験²⁾や実大構造物の加熱実験³⁾などの爆裂判定法が提案されている。また、谷辺らによれば、爆裂現象は加熱面に対して水平方向のひび割れ上に生じる水蒸気圧力と熱応力の複合力に起因すると考えられている⁴⁾。

一方、解析的にはメソスケールの観点からコンクリートを粗骨材(Include)とモルタル(Matrix)から形成され

る複合材料として評価する試みがなされている⁵⁾。また先行研究で、マイクロトモグラフィーによる受熱したセメント硬化体のミクロストラクチャーが明らかにされている⁶⁾。さらに、SEMによって加熱時に骨材とセメント硬化体の熱膨張係数の差から生じるクラックの観測が行われ、法則性があることが明らかにされている⁷⁾。

そこで本研究では、中性子線を用いたイメージング技術である中性子ラジオグラフィ(NR)を高温加熱下における高強度コンクリートに適応することで、空間分解能、位置分解能が高い水分量の測定を試みた。さらに、メソスケールの視点から高強度コンクリートの高温加熱時の脱水について実験的に明らかにすることを目的とした。

2. 試験概要

試験体に使用する高強度コンクリートはW/B=18%, 材齢1年とした。また、粗骨材に佐野産石灰岩を使用した

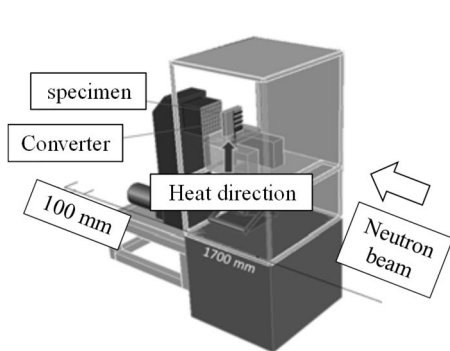


Fig. 1 Experimental set up.

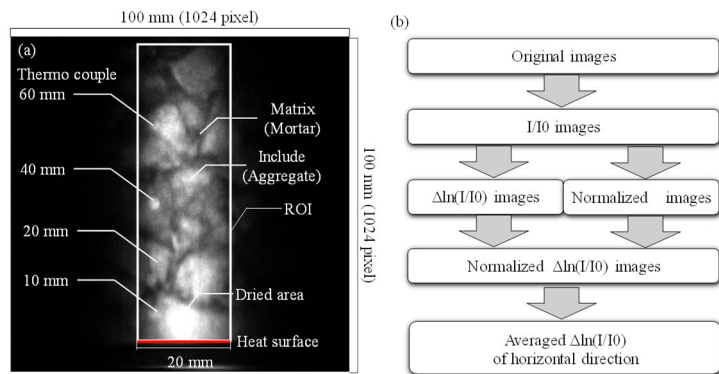


Fig. 2 (a) Transmission image of specimen (b) and analytical procedure.

*1 東京理科大学院 理工学研究科 建築学専攻 (学生会員)

*2 東京理科大学 理工学部建築学科 助教 工博 (正会員)

*3 京都大学複合原子力科学研究所 助教 工博

*4 東京理科大学 理工学部建築学科 教授 工博 (正会員)

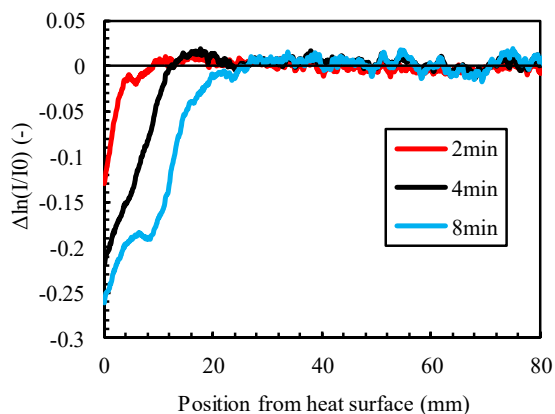


Fig. 3 Position from heat surface vs amount of substance per matrix.

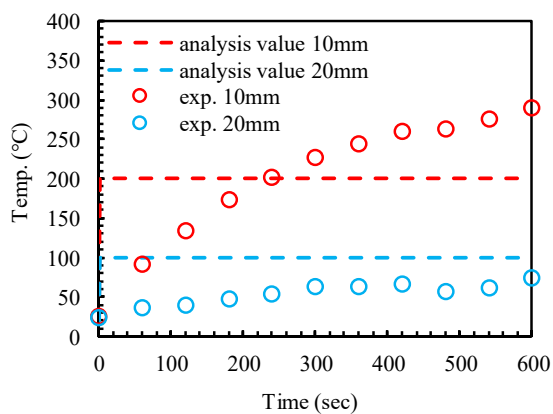


Fig. 4 History of internal temperature of specimen. Full line show experimental data. Broken line and plot which circle show analysis data.

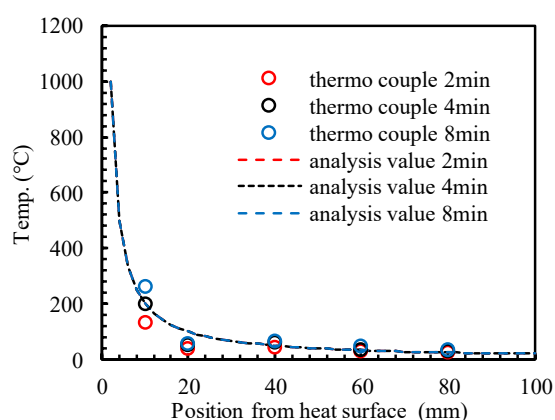
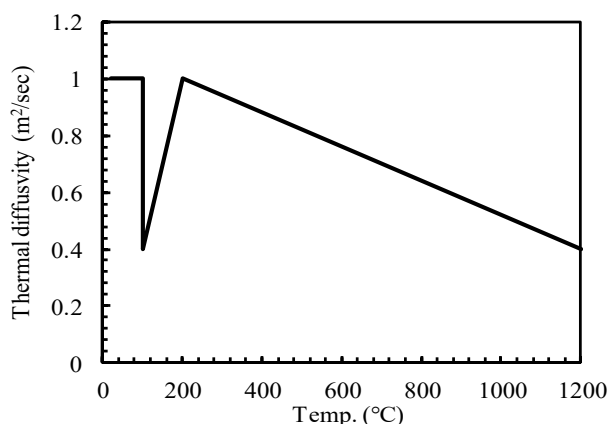


Fig. 5 (a) Temperature field of specimen. Broken line show experimental data. Plot which circle show analysis data. (b) Thermal diffusivity depended temperature.



石灰岩コンクリートと青梅産硬質砂岩を使用した硬質砂岩コンクリートを作製した。試験体は 100×100×400 mm の型枠に打設し、28 日間水中養生した後脱型した。その後、厚さ 20 mm に切断後、熱電対を設置する穴を設け、温度 20°C、湿度 60%環境下で試験開始まで保存した。

加熱にはブゼンガスバーナーを使用し、LP ガスの流出量をマスフローにより制御した。試験体内部温度の測定は熱電対を用いて行い、加熱面の温度と加熱面から 10, 20, 40, 60, 80 mm の位置の温度を測定した。加熱の結果、加熱面温度は加熱開始から数秒で約 1000°C一定となった。

NR の測定レイアウトを Fig. 1 に示す。NR 測定は京都大学複合原子力科学研究所の研究用原子炉(KUR)内の B-4 ポートを使用し、出力 1MW 定常運転時の中性子線を使用した。その際、散乱中性子線の影響を考慮してコンバーターと試験体の距離を 100 mm 離れた。また、使用した CCD カメラの画角は 100×100 mm であり、本測定における空間分解能約 0.1 mm/pixel であった。露光時間は透過画像 1 枚当たり 5 sec とした結果、画像 1 枚当た

りの撮影時間は転送時間を含めて 5.61 秒であった。加熱開始から 10 分間撮影を続け、合計 107 枚の透過画像を取得した。

3. 解析概要

3.1. 画像解析概要

Fig. 2 (a)に試験体加熱中における中性子透過画像を示す。NR 測定によって得られた画像は 1024×1024pixel であった。また、入射中性子画像から画像中心部 20mm の位置に中性子の入射を確認したので、解析領域 (ROI)を Fig. 2 (a)に示す領域に設定した。Fig. 2 (a)から白く表示している領域は中性子線射出方向に対して骨材量が多い部分であり、黒く表示されている部分はモルタルが多い部分である。また、乾燥している領域がより白く表示されていることが分かる。Fig. 2 (b)に画像解析のフロー図を示す。加熱中の中性子透過画像を入射中性子画像で除すことで I/I₀ 画像を作成した。その後、加熱前の I/I₀ 画像と加熱中の I/I₀ 画像の差分を取り、物質質量に変換することで Δln(I/I₀) 画像を作成した。また、加熱前の I/I₀ 画像

から1画素(pixel)当たりのマトリックス量分布画像を作成し⁸⁾,その後, $\Delta \ln(I/I_0)$ にマトリックス量分布画像を乗することで標準化した $\Delta \ln(I/I_0)$ 画像を作成した。さらに,加熱面に対して水平方向に平均をとることで2次元データを1次元データに変換した。

Fig. 3 に加熱面からの試験体内部位置に対する単位マトリックス当たりの水分量の変化を示す。コンクリートの加熱実験で想定される物質量の減少は H_2O の移動, 脱水と $600^\circ C$ における石灰岩骨材の脱炭酸化であるため水分の移動, 脱水が NR で得られる物質量の変化量として観測される。よって, $500^\circ C$ までのコンクリート加熱実験では物質の損失量 $\Delta \ln(I/I_0)$ は H_2O (水)によるところが支配的であると仮定すると, $\Delta \ln(I/I_0)$ は単位マトリックス当たりの水分量であると考えられる。よって, 加熱時間が増加するにつれて H_2O 損失領域の増加が確認された。 H_2O の損失領域と試験体内部温度の関係を明らかにするためには, $100^\circ C$ 以上の詳細な試験体温度分布が必要である。そこで, 非定常熱伝導解析を1次元の差分法を用いて行った。

3.2. 温度解析概要

差分化された非定常状態熱伝導の基礎式を式(1)に示す。

$$T_n = \theta_x(T_{n+1} - T_{n-1}) + (1 - 2\theta_x)T_n$$

$$\theta_x = \frac{\alpha \Delta t}{\Delta x^2} \quad (1)$$

ここで示す T : 温度, n : 要素数, α : 熱拡散係数, Δt : 時

間幅, Δx : 要素幅である。無限媒介中への伝導伝熱を仮定すると式(1)を変形して, 式(2)となる。

$$T_n = \theta_x \left(1 + \frac{1}{n}\right) T_{n+1} + \theta_x \left(1 - \frac{1}{n}\right) T_{n-1} + (1 - 2\theta_x) T_n \quad (2)$$

本解析では加熱面の温度を $1000^\circ C$ 一定であると仮定し境界条件を設定した。また, 加熱開始から4分の実測値の温度と解析値がおおむね一致するように熱拡散率を設定した。

Fig. 4 に試験体内部温度の実測値と解析値の経時変化を示す。**Fig. 4** に示す実線は実測値, 点線は差分法による解析値である。非定常熱伝導は差分法を用いて行い, 時間幅 $\Delta t = 5.0 \times 10^{-5}$ 秒, 要素幅 $\Delta x = 1$ mm とした。また, 熱拡散率を温度依存の関数として扱い, 既往の文献値⁹⁾ に示されている $100^\circ C$ における水の蒸発による潜熱と水和物の脱水に伴う熱拡散率の低下を表す概形に近いものとした。**Fig. 4** から加熱面温度を $1000^\circ C$ 一定とした場合試験体内部温度の解析値の経時変化は一定値を示し計時変化を示さなかった。これは, 時間幅 Δt の設定値が大きかったため定常状態になってしまったためと考えられる。

Fig. 5 (a) に試験体内部温度分布と解析値を示す。**Fig. 5 (a)** に示す破線は解析値, 円状の散布図は実測値である。**Fig. 5 (a)** の実測値から熱電対による温度測定という測定方法の制約により, 位置分解能が 10 mm 程度のデータしか得られない。本研究で用いた試験体サイズでは爆裂現象は加熱面からおおよそ $2-3$ mm の位置で生じることが

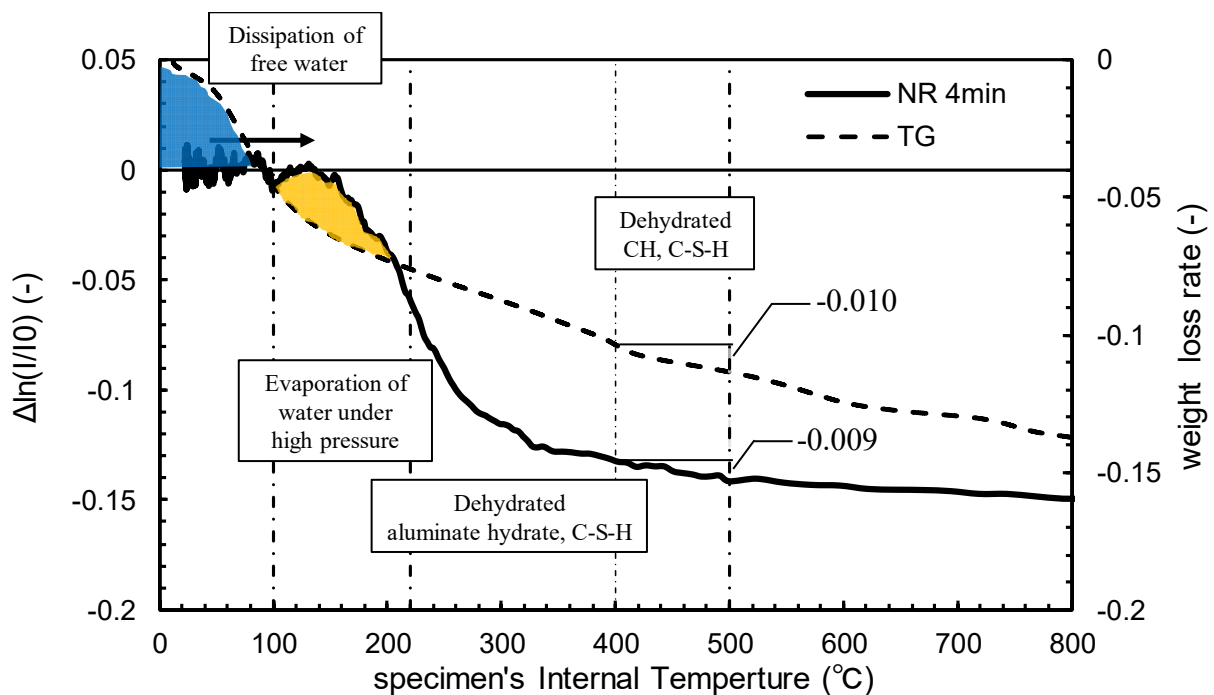


Fig.6 Analysis data of specimen's internal temperature vs amount of substance per matrix at 4min to heat start. Broken line show weight loss rate that measured cement paste (W/B=0.18) by TG.

予備試験で分かっている。よって本研究における爆裂現象に影響する加熱面から 10 mm 以内で生じると推測される。本研究における爆裂現象を議論するうえで加熱面から 10 mm 以内の温度データが必要である。よって差分法による解析値を用いて実測値の温度データを補完した。

Fig. 5 (a)における加熱面から 10mm の位置に着目すると、加熱初期における解析を用いて導出した試験体内部温度は実測値よりも高く、加熱終期における試験体内部温度は実測値よりも低い値を示した。また、加熱面から 20 mm の位置に着目すると、解析値は実測値よりも高い値を示した。本解析では、Fig. 5 (b)に示す熱拡散率より、水の蒸発による潜熱やセメント水和物の脱水に伴う熱拡散係数の低下の影響を考慮しているが、水分移動による対流熱¹⁰⁾考慮していないため見かけの潜熱が実際より小さい。よって、実測値の差が生じたと考えられる。しかし、加熱開始から 4 分時の試験体内部の温度場はおおむね実験値を近似できているため、今後、温度と物質減少量の関係を議論するうえで加熱開始 4 分時のデータを用いるものとする。

4. 結果

Fig. 6 に NR より得られた加熱開始から 4 分時における試験体内部温度の解析値に対する単位マトリックス当たりの物質質量を示す。破線はセメントペースト (W/B=18%) の熱重量 (TG)測定から得られた重量減少率

である。TG 測定には W/B=18% のセメントペーストを使用し、練り混ぜ後 5×5×10 mm の型枠に打設した。その後、24 時間で脱型し、28 日間の水中養生を経て温度 20°C、湿度 0%環境下で 24 時間以上乾燥させたあと粉体化し、10 mg を測定に使用した。TG 測定にはプラチナパンを使用し、パンは解放系とした。

Fig. 6 の実線から NR を用いることで試験体内部温度が 100°C以上時に物質質量が減少する結果が得られ、800°C 時には約 0.15 まで物質質量が減少した。また、温度に対する TG より得られた質量減少率と NR より得られた物質減少量を比較すると、20°Cから 220°Cにおいて質量減少率は物質減少量より小さい値を示した。しかし、220°Cから 500°C時における温度に対する質量減少率と物質減少量の値はおおむね一致した。

一般的にコンクリート中の自由水は 100°Cまでに蒸発、逸散し、セメント水和物であるアルミネート化合物と C-S-H は 100°C以上から分解、脱水を開始する。そして、水酸化カルシウム(CH)は 400°Cから 500°C間において分解する。400°Cから 500°C間における NR で得られた物質減少量と TG から得られた質量減少率を比較するとおおむね一致した。また、石灰岩は 600°Cに脱炭酸化を生じるので石灰岩コンクリートの 600°C時の物質減少量は二酸化炭素を含む。よって、500°Cまでの単位マトリックス当たりの物質減少量はセメントペーストの質量減少率を示している可能性が高い。しかし本研究では、NR 測定では

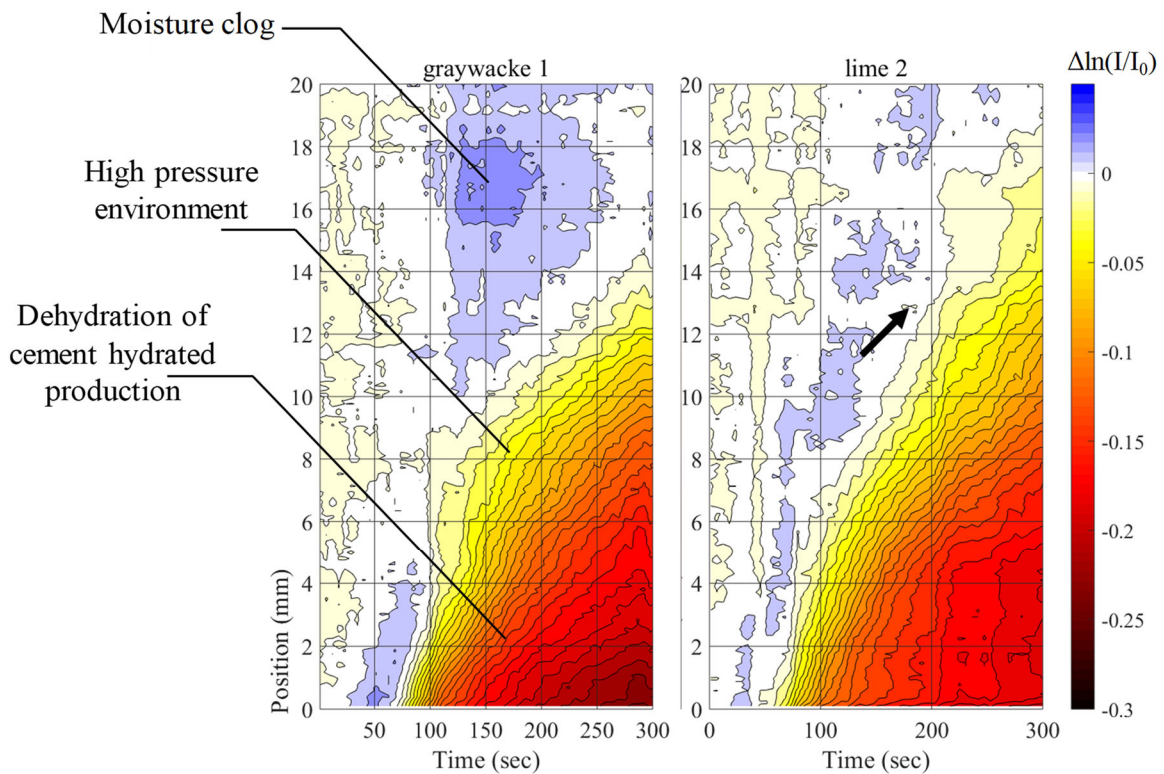


Fig.7 Legend and distribute of amount of substance per matrix unit.

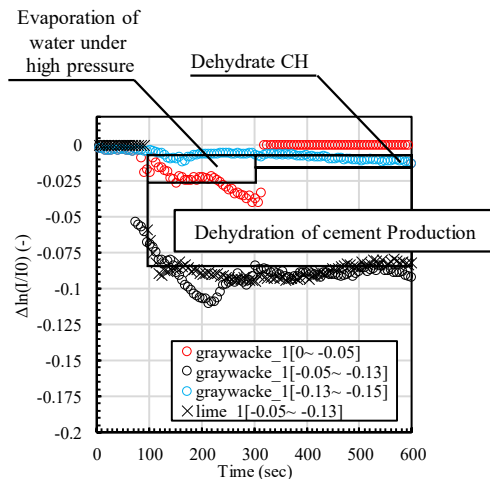


Fig.8 H₂O reduction per matrix in ROI at each time and amount of substance.

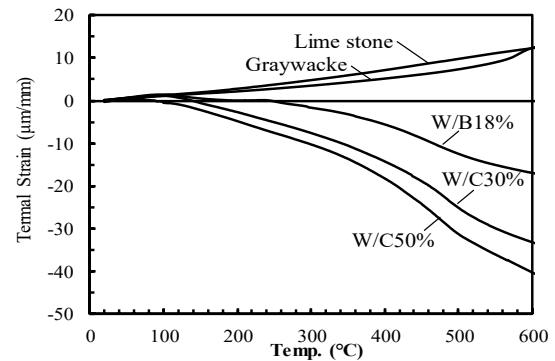


Fig.9 Thermal strain of include and cement paste.

材齢 1 年のコンクリート、TG 測定では材齢 1 年のセメントペーストを使用している。材齢 1 年のコンクリートではポズラン反応が進行し、CH 量が材齢 1 か月のセメントペーストと比較して少ないと予想される。よって重量減少率と物質減少量の関係については今後さらに検証が必要と考えられるが、本研究では物質減少量と質量減少量は同値であると仮定して議論を進める。

一方、TG の結果では温度 20°C 湿度 0% 環境下で乾燥させたにもかかわらず、100°C までの質量減少が確認されたが、NR では確認されなかった。これは、試験体内部に水分移動の停滞領域が形成されることに起因する水蒸気圧増大が原因と考えられる。H₂O の蒸発温度は気圧によって決定され、気圧が高いほど蒸発温度が高くなる。すなわち気圧が常圧状態にある TG 測定では H₂O の蒸発温度は 100°C であるが、試験体内部では気圧が高いため H₂O の蒸発温度は 100°C 以上であると考えられる。

Fig. 6 に 100°C 以上で脱水する水分における NR と TG の差分量を黄色のマーカーで示す。Fig. 6 から 220°C において NR の脱水量が TG の脱水量を上回っている。このことから黄色いマーカーで示した差分水分量は水分移動の停滞により生じた高圧環境を形成している水分であると推測する。よって試験体内部に 100°C 以上 220°C 以下の領域で蒸発する H₂O が存在するという事は、高圧な領域が形成されていると推測される。しかし、本解析では水の対流の影響による熱輸送の影響を加味していないため、実際の試験体温度は 220°C よりも小さい可能性がある¹⁰⁾。既往の文献によれば PP 繊維を混入したリング試験体内部の水蒸気圧の最大値は 200 °C 近傍で約 4MPa であると報告されている¹¹⁾。よって、試験体内部温度 200°C 近傍に高圧環境が形成されているのではないかと推測する。また、本研究では $\Delta \ln(I/I_0)$ を計算時使用したイニシャルの透過画像を撮影するとき自由水を含んで

いる状態であるため、高圧環境下における水分量の導出までは至っていない。

Fig. 7 に単位マトリックス当たりの物質量の分布と経過を表すコンタ図を示す。Fig. 7 は、取得した 107 枚の中性子透過画像を Fig. 2 (b) に示す処理を施し、得られた行列を x 軸に計測時間、y 軸に加熱面からの距離、z 軸に物質減少量をプロットすることで作図した。黒く表示されている部分では脱水が進行し、青く表示されている部分では水分量が増加しことを示している。Fig. 7 より硬質砂岩を使用した試験体では水分量が増加している領域 (moisture clog) が確認されたが、石灰岩を使用した試験体では、水分量が増加している領域が少ない結果を示した。また、加熱前と加熱後の試験体重量から石灰岩を使用した試験体の重量減少量は 3.5g であり、硬質砂岩を使用した試験体の重量減少量は 3.0g であった。よって、加熱による重量減少量から加熱中において石灰岩を使用したコンクリートのほうが硬質砂岩を使用したコンクリートより水分が逸散しやすい状態であったと考えられる。

また、Fig. 6 から得られた温度と単位マトリックス当たりの物質減少量の関係から得た値を用いて、高圧環境が存在する部分を黄色に、セメント水和物が脱水、分解する部分を赤色に表示されるようコンタ図のカラーマップを調節した。Fig. 7 から高圧環境の存在領域は時間が経過するとともに試験体深部に移動していることが示されている。また、高圧環境の存在領域は水分量が増加している領域の直下に形成されていることが分かる。

Fig. 8 に NR より得られた各時間、損失物質質量における単位マトリックス当たりの脱水量の平均値を示す。Fig. 6 より各物質減少量を $\Delta \ln(I/I_0) = -0.05 \sim 0$ 、高温高圧状態における H₂O の蒸発、 $\Delta \ln(I/I_0) = -0.05 \sim -0.13$ 、220°C から 400°C におけるセメント水和物の脱水、分解により放出される H₂O、 $\Delta \ln(I/I_0) = -0.15 \sim -0.13$ 、CH の分解によっ

て放出する H₂O と定義した。Fig. 8 より加熱を受けた試験体が放出する H₂O はセメント水和物の脱水分解によるところが大きいことが分かる。また、骨材種が異なる場合における単位マトリックス当たりのセメント水和物の脱水量に及ぼす影響は確認されなかった。しかし、Fig. 7 に示した等高線から石灰岩コンクリートは高圧環境の存在領域がより深部に移動している様子が観察できる。これは、Fig. 8 に示した脱水量は試験体を構成しているマトリックス量を標準化しているため、骨材の影響を少なく評価していると予想される。よって、高温環境下における水分移動は骨材とマトリックス間に生じる現象の影響を受けると考えられる。

Fig. 9 に本実験で使用した粗骨材とセメントペーストの熱変形を示す。セメントペーストは水分対比を 0.18 とし 5×5×10 mm の型枠に打設し、28 日の水中養生を経て温度 20℃、湿度 0% の環境下に測定開始時まで静置した。粗骨材は直径 20 mm を使用し、5×5×10 mm の直方体に切り出し、セメントペーストと同じ環境下で測定まで保存した。

5. 考察

Fig. 9 より環境温度が上昇するとともに骨材は膨張挙動を示し、セメントペーストは収縮挙動を示した。また、環境温度 500℃時の熱変形量は石灰岩のほうが硬質砂岩よりも 3 μm/mm 程度大きい値を示し、セメントペースト (W/B18%) と石灰岩の差はおおよそ 20 μm/mm であった。よって、骨材径 20 mm の石灰岩を使用した場合、試験体内部温度が 500℃時に試験体内部の石灰岩は 4 mm、硬質砂岩では 3.2 mm の熱変形が生じる。骨材の熱変形はマトリックスが拘束し、応力のつり合いが取れなくなった場合、破壊が伴うので、骨材周辺にネットワーク状に形成されるマイクロクラックが生じる。よって、石灰岩のほうが硬質砂岩よりも 500℃時までの熱変形量が大きいため、ネットワーク状に形成されるマイクロクラック量が大きいと考えられる。そして、ネットワーク状に形成されたマイクロクラックを通過して高温高圧状態の液状水と水蒸気が移動するので、石灰岩コンクリートは硬質砂岩コンクリートよりも水分が逸散しやすい状態であったと考えられる。

6. まとめ

試験体内部に 100℃以上 220℃以下で蒸発する自由水の存在が示唆され、高圧領域が形成されていると推測した。また、高圧領域は加熱時間が経過するとともに試験体深部に移動していることが示された。さらに、高圧領域は水分量が増加している領域の直下に形成されている

ことが分かった。また、石灰岩コンクリートのほうが硬質砂岩コンクリートより高圧領域が材料深部に形成されていた。よって、高温環境下における水分移動は骨材とマトリックス間に生じる現象の影響を受けると考えられる。

【謝辞】

本課題は平成 30 年度 京都大学原子炉実験所 共同利用研究課題「各種建築材料の温度作用下における非定常水分挙動に関する研究」(30P2-10 代表 兼松学)により実施した。また、試験体の作製に太平洋セメント(当時東京理科大学院)関根麻里子氏、東京理科大学院上野一貴氏、加熱実験に東京大学野口貴文氏、田村政道氏、中性子イメージングの実験に京都大学複合原子力科学研究所齊藤泰司氏、東京理科大学宮部あづさ氏に協力していただいた。ここに感謝を示す。

【参考文献】

- 1) JCI: 高温環境下におけるコンクリートの性能評価に関する研究委員会報告書, 2017
- 2) 石塚遼, 小澤満津雄ら: 拘束リング試験方法によるコンクリートの爆裂性状の解析的検討, コンクリート工学年次論文集, vol.36, No.1, 2014
- 3) 森田武ら: 火災時における高強度コンクリート部材の爆裂性状の改善に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文, No.544, pp.171-178, 2016
- 4) 谷辺徹: 高温下におけるコンクリートの爆裂性状とリング拘束試験方法, 岐阜大学院工学研究科博士課程後期課程, 平成 29 年
- 5) Jie Zhao, Klass van Breugel: A meso-level investigation into the explosive spalling mechanism of high-performance concrete under fire exposure, Cement and Concrete Research, vol.65, pp.64-75, 2014
- 6) Michael Henry etc.: Cracking and Chemical Composition of Cement Paste Subjected to Heating and Water Re-Curing, Journal of Advanced Concrete Technology, vol.14, pp. 134-143, 2016
- 7) Yu-Fang Fu etc.: Experimental study of micro/macro crack development and stress-strain relations of cement-based composite materials at elevated temperatures, Cement and Concrete Research, 34, pp. 789-797, 2004
- 8) 土屋直子ら: 中性子ラジオグラフィによるコンクリート中の水分定量に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 30, No. 2, 2008
- 9) 日本コンクリート工学会: コンクリートの高温特性と構造物の耐火性能に関する研究委員会報告書, 2012
- 10) 丸山一平ら: 水熱連成解析に基づく高強度マスコンクリート中の温度及び湿度分布の予測, 日本建築学会構造系論文集, No. 609, pp. 1-8, 2006
- 11) 木村和広, 小澤満津雄: 繊維補強コンクリートの爆裂性状と内部水蒸気圧との関係, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1, 2