

論文 高強度コンクリートの爆裂時の水分挙動に関する研究

榎村 剛^{*1}・兼松 学^{*2}

要旨：高強度コンクリートは火災時に爆裂することが知られているが、そのメカニズムについて完全には明らかになっていない。内部の水分が大きく関係していると考えられることから、中性子ラジオグラフィを用いて、高温加熱時のコンクリート内部の水分移動の測定を非破壊で行った。測定は京都大学の実験用原子炉 KUR にて行い、この装置の定量性について確認した。実験により、爆裂発生前後の水分分布を得ることに成功した。得られた結果から爆裂の原因とされる水分溜りを確認した。また、有機繊維混入法の爆裂抑制効果について確認し、爆裂抑制メカニズムの一端を説明することが出来た。

キーワード：中性子ラジオグラフィ、水分移動、高強度コンクリート、爆裂、有機繊維

1. はじめに

高層建築に利用される、高強度コンクリートは火災時に発生する爆裂が懸念されることから、繊維混入などの対策が取られることが一般的である。

爆裂のメカニズムについては水蒸気圧説、熱応力説など諸説あるが、未だ完全に明らかになっていないのが現状である。しかしながら、Hertz は、重量含水率が3~4%以下のような低含水率で爆裂の可能性が減ることにに関して、熱応力説だけでは説明できないと報告している¹⁾。加えて、「絶乾状態で爆裂した」という報告は見られないことなど、コンクリート内部の水分が密接に関係していると考えられることから、そのメカニズム解明が必要と考えられる。

コンクリート中の水分測定は、何らかの測定器を埋設する方法が一般的である。しかしながら、高温下における水分状態の測定は困難である上、爆裂現象のような局所的な水分現象を捉えることは非常に困難であった。

著者ら²⁾は、これまでの研究で、非破壊測定法のひとつである中性子ラジオグラフィ³⁾（以下、TNRF と略記）を用い、柱部材を模擬した高温加熱実験を行い、高温下における水分溜りの存在や、骨材周辺で局所的に乾燥が早まることなどを示した。しかしながら、爆裂自体を確認することは出来なかった。

本研究では、TNRF を用いて、爆裂時の水分挙動を明らかにするとともに、爆裂対策として知られる有機繊維の役割を明らかにすることを目的とし、火災を模擬した高温加熱時の高強度コンクリート内部を測定した。

2. 実験概要

2.1 中性子ラジオグラフィについて

中性子ラジオグラフィの測定原理を図-1 に示す。

本研究における TNRF の実験は、すべて京都大学原子炉実験所の研究用原子炉 KUR の B-4 実験室の中性子ラジオグラフィ装置を用いて行った。装置の仕様を表-1 に示す。ここでは、著者らのこれまでに研究利用した JRR-3 の仕様と比較して示す。KUR には原子炉出力が 1MW 運転と 5MW 運転があり、取得画像の解像能に関わる中性子束は、5MW 運転時で 5.0×10^7 と JRR-3 に比して一桁ほど小さい値となる。表-1 に示す 5MW 運転時の仕様を示す。

本研究では、5 秒間の露光設定で撮影を行い、CCD カメラをパソコンに繋いで読み取った。データの転送にかかる時間を含めると、一枚の画像を得るのに約 5.5 秒かかることになる。

コンクリート中の水分定量方法は、土屋らによって示された透過率を水分強度に変換して解析する手法⁴⁾を用いた。水分強度とは、水素原子量に依存した値のことで、こ

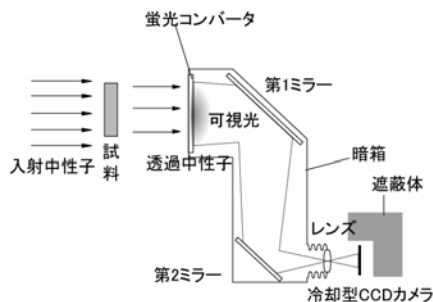


図-1 測定の原理

表-1 TNRF の仕様

	JRR-3	KUR B-4 (at5MW)
中性子束 (n/cm/sec)	1.2×10^8	5.0×10^7
CCD カメラ	1008 × 1024	1024 × 1024
取得画素数 (pixel)	(14bit)	(10bit)
空間解像能 (μm/pixel)	約 100	
撮影時間	1.2 秒	5 秒
転送時間	約 8 秒	約 0.5 秒

*1 東京理科大学大学院 理工学研究科建築学専攻 院生 (学生会員)

*2 東京理科大学 理工学部建築学科 准教授 工博 (正会員)

ここでは主に水分量に依存するため、この名称を使う。

2.2 試験体概要

実験に用いたコンクリートの調合を表-2 に示す。水紛体比 18%とし、シリカフェウムを混和材として用いた。

また、有機繊維の爆裂抑制効果について検討するため、上記の水紛体比 18%の調合に、体積比で 0.1%ポリプロピレン繊維（以下、PP 繊維と略記）を混入した試験体を作成した。PP 繊維の性能を表-3 に示す。

試験体の水準を表-4 試験体は脱型後 28 日間水中養生し、厚さ 2cm に切断したものをを用いた。W/C 18%のものは、切り出した後、約 3 週間気中に放置 (20℃, 40%RH) したもの（以後、気中と呼ぶ）、水中に入れ続けたもの（飽水）、約 2 週間気中に置いた後 1 週間 105℃乾燥にかけたもの（絶乾）の 3 つの含水状態のものの水準とした。また、PP 繊維混入試験体は、同様に切断した後、約 3 日気中に放置したもので実験を行い、比較として同様の養生状態の繊維なしの試験体でも実験を行った。

加熱の際は、火の回り込みによる側面からの加熱を防ぐため、耐熱レンガを 1cm に切ったものでシーリングした。耐熱レンガは中性子の透過が非常によく、厚さ 1cm ではコンクリートの撮影結果には殆ど影響を及ぼさないことを確認している。

耐熱レンガと試験体はアルミのアンクルで止め、アンクル部分と拘束治具をネジで止め、試験体を固定した。また、爆裂の衝撃で試験体が大きく傾いたり、倒れたりすることの無いよう、アルミ製の拘束治具で固定した。

2.3 加熱方法概要

加熱源にはブンゼンガスバーナーを用い、LP ガスボンベを実験室内に持ち込んで使用した。

ガスバーナー、試験体、耐熱レンガなどをアルミ容器に納めた。ガスバーナーと試験体の位置関係の調整には耐熱レンガを用いた。中性子線の出るシャッター、撮像系と加熱装置の位置関係を図-2 に、加熱のイメージを図-3 に示す。また、試験体とコンバーターとの間隔はアルミ容器の板を挟んで 10cm とした。コンバーターに火害の加わることの無いように設置した距離である。

本実験装置の加熱曲線を図-4 に示す。加熱開始 30 秒で 1000℃に達し、以後 1000℃以上を維持した。試験体の加熱は 10 分間行う。その間、撮像系への引火やコンバーターが変形するなどの火害はなく、安全に実験を行える状況を作った。

3. KUR における TNRF の定量性

KUR において、セメント系材料に中性子ラジオグラフィを適用し、かつ定量を試みた事例は見られないため、加熱実験に先立って本試験装置を用いた場合の定量性についての検討を行った。

表-2 試験体調合表

W/B	単位量(kg/m ³)					繊維	混和剤	減泡剤	空気量
	W	C	SF	S	G	PP	C×(%)	C×(%)	(%)
18%	160	800	88.89	425	1060.2	0.1%vol	2.7	0.70	2
	160	800	88.89	566.7	916.4		3	0.70	2

C+SF=B 細骨材(砕砂)・粗骨材:硬質砂岩

表-3 PP 繊維の緒元

繊維長さ	12mm
平均繊維幅	110×10 ⁻³ mm
平均繊維厚さ	40×10 ⁻³ mm
単位容積質量	0.91 g/cm ³

表-4 試験体水準

W/C	含水状態	PP繊維
18%	気中	○
	飽水	×
	絶乾	×



写真-2 試験体



写真-3 アルミ容器と撮像系

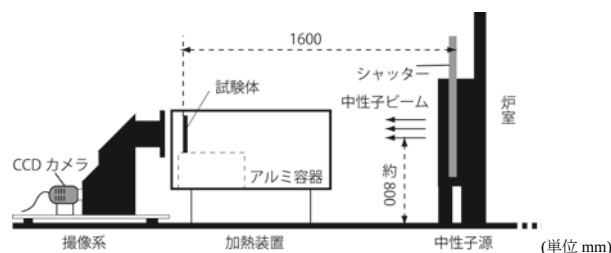


図-2 撮像系、加熱装置、中性子源のレイアウト

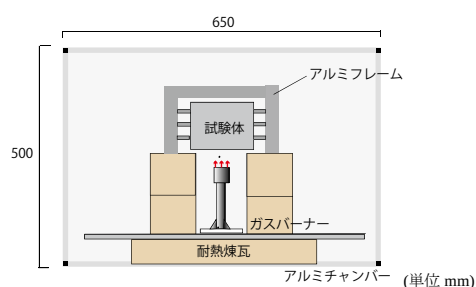


図-3 加熱のイメージ

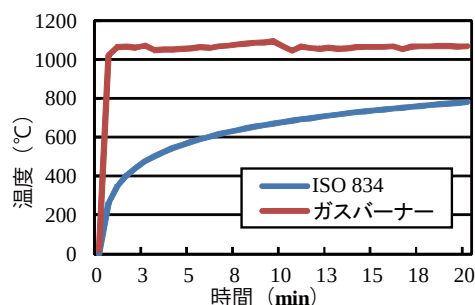


図-4 加熱曲線

3.1 定量可能範囲の検討

KUR の中性子源は、コンバーターにより撮影される画角に対して中性子の照射範囲が狭く、画像中の座標によって測定精度が異なることが考えられた。そこで、表-2 と同一の調合の試験体（PP 繊維無混入）を撮影することで、定量性を確保しつつ測定可能な範囲の測定を行った。尚、試験体の含水率をもっとも透過率が低くなる飽水状態の試験体、すなわち、脱型後より水中養生した試験体を用いた。また、5MW と 1MW 運転に対して、それぞれ検証を行った。

まず、コンバーターの前に何も置かない状態で撮影した画像（shade と呼ぶ）について、中性子が有意に検出される測定可能範囲を確認した。図-5 に shade 画像の中性子照射範囲を示す。

次に飽水試験体の撮影を行い、既往の文献⁴⁾と同様の手法で画像処理し、画像の輝度値と試験体の水分量が対応する水分強度の分析を行った。図-6 にその結果を示す。図より試験体内で均一に水分強度が分布しているのが確認できるが、図-5 と対応して図中の枠線範囲外で急激に測定値が大きくなる現象が見られたことから、その変曲点をもって測定可能範囲と判断した。5MW 運転時には X 軸方向に 200pixel（約 2cm）、Y 軸方向に 850pixel（約 9cm）の範囲で、1MW 運転時には X 軸方向に 200pixel（約 2cm）、Y 軸方向に 800pixel（約 8cm）の範囲において測定可能であると判断した。

3.2 キャリブレーション試験

予め試験体の相対含水率を調整した試験体を複数作り撮影することで、水分量と水分強度の関係について検討した⁴⁾。調湿は重量法により行い、105℃乾燥を 1 週間行ったものを相対含水率 0%、水中養生終了直後、乾燥開始直前の状態を飽水として扱った。相対含水率 0, 20, 40, 60, 80, 100% となるように調湿を行い、撮影の直前に重量を計測し改めて単位体積当たりの水分量を求め水分強度との関係を検討した。実験結果を図-7 に示す。図より、5MW、1MW とともに低含水領域において水分強度が一定値に収束する傾向が見られたことから、 0.06g/cm^2 に閾値を仮定し近似を行ったところ、共によい相関を示した。尚、既往研究より、近似は線形で行った⁴⁾。

以上より、KUR における測定の妥当性を確認し、以降では、低含水域を除いて水分強度により定量的評価があると判断して議論を進める。尚、100%を超える領域については同様の線形性を有すると考えるが、低含水領域に関しては、現時点では測定の相対的な大小のみの評価は可能と考えるが、今後のさらなる検討が必要である。

3.3 ホワイトスポットノイズの除去と時間分解能

コンバーターによる画像は、ガンマ線などの影響により、ランダムに輝度が異常値を示すノイズが生じることが知られている。このノイズを除去するには、連続撮影した画像を用いて同地点のピクセルを比較して異常値を除去する手法がとられる。これらの処理は簡便であるが、

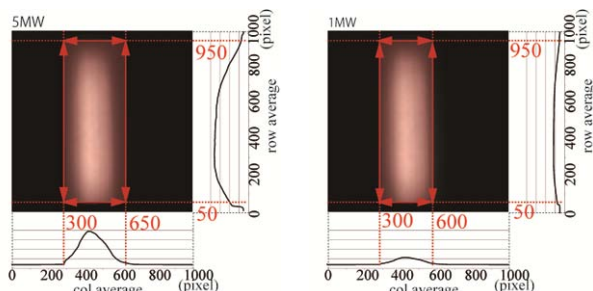


図-5 shade から

求めた定量可能範囲

（グラフ縦軸は透過度）

	X軸方向	Y軸方向
5MW時	300～650	50～950
1MW時	300～600	50～950

（単位：pixel）

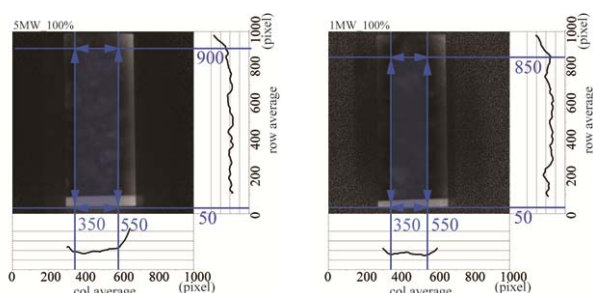


図-6 飽水試験体の結果

から求めた定量可能範囲

（グラフ縦軸は透過率）

	X軸方向	Y軸方向
5MW時	350～550	50～900
1MW時	350～550	50～850

（単位：pixel）

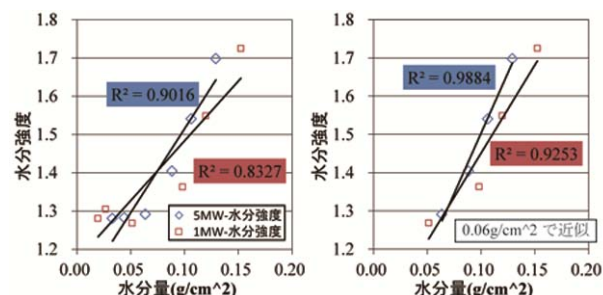


図-7 キャリブレーション結果

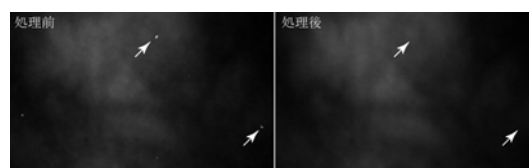


図-8 ホワイトスポットノイズの除去

（左：2-min-1 処理前 右：処理後）

表-5 水準ごとの実験結果

水準	試験体数	爆裂発生
気中	8	7
絶乾	2	0
飽水	2	0
PP繊維混入(気中3日)	2	0
PP繊維なし(気中3日)	1	1

測定の時間分解能の低下につながる。

例えば、土屋ら⁴⁾は3枚を1枚にする処理を行っているが、JRR-3 に比して KUR の雰囲気中のガンマ線量が低くノイズ量が小さいことが確認されたため、本研究では、2枚の輝度の最小値を取り、1枚の画像にする 2-min-1 処理を採用した。図-8 に処理前と処理後の画像を示す。2-min-1 処理の採用により、本研究での時間分解能は 11 秒/画像となる。

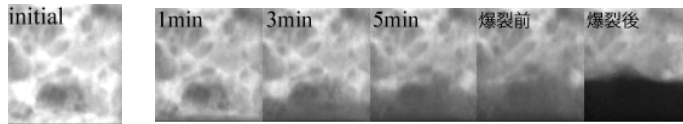


図-9 気中試験体の水分強度画像

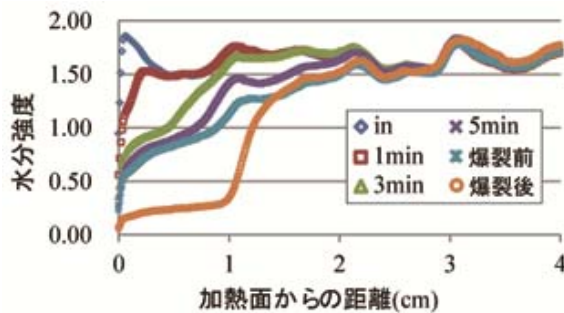


図-11 気中試験体の加熱面からの距離と水分強度 / 差分水分強度のグラフ

4. 加熱実験の結果

4.1 水準による違い

実験結果を表-5 に示す。気中試験体 (相対含水率約 90%) は、8 つの試験のうち 7 つで爆裂が発生した。飽水試験体、絶乾試験体、PP 繊維混入試験体は爆裂が発生しなかった。

爆裂が発生するときは、試験体一つで複数回発生することもあり、加熱開始から最短で約 1 分、最長で約 7 分

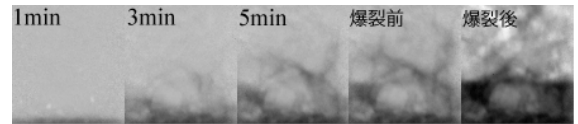


図-10 気中試験体の差分水分強度画像

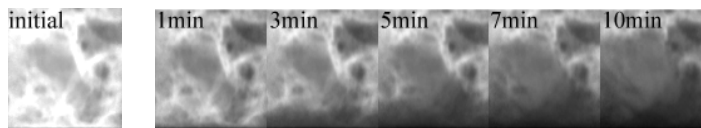
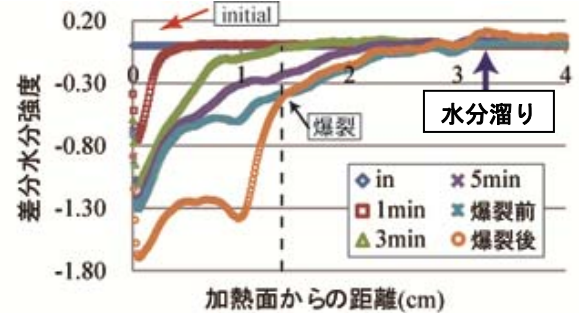


図-12 飽水試験体の水分強度画像

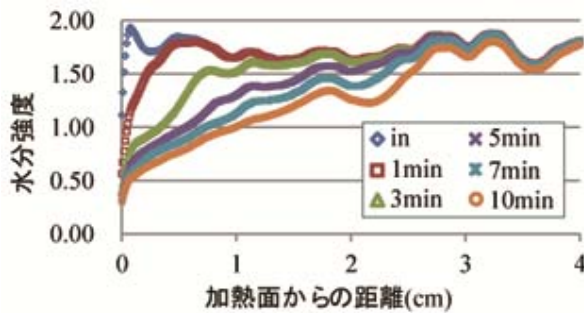


図-14 飽水試験体の加熱面からの距離と水分強度 / 差分水分強度のグラフ

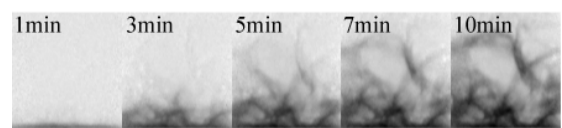


図-13 飽水試験体の差分水分強度画像

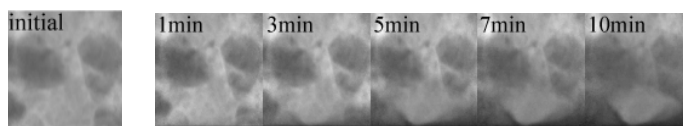
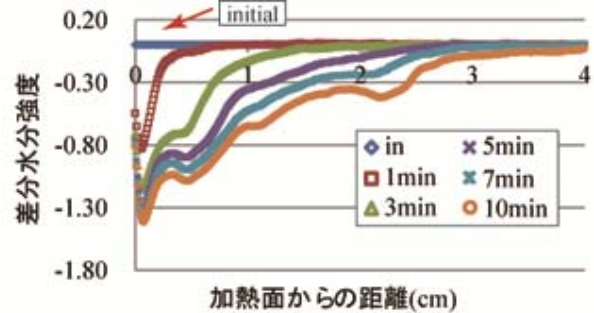


図-15 絶乾試験体の水分強度画像

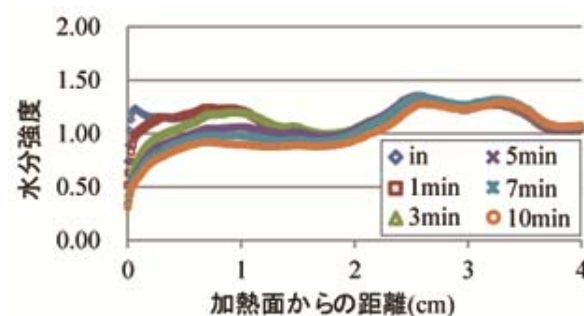


図-17 絶乾試験体の加熱面からの距離と水分強度 / 差分水分強度のグラフ

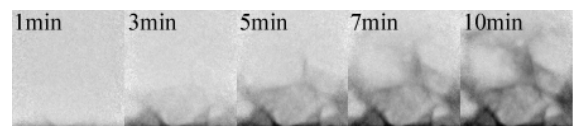
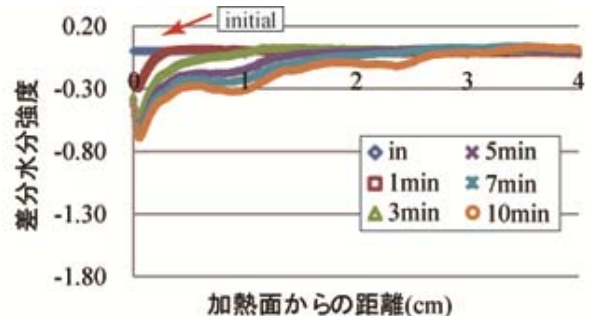


図-16 絶乾試験体の差分水分強度画像



まで爆裂が発生した。試験体が小型であったことから、長時間では爆裂が発生しなかったと考えられる。

4.2 中性子ラジオグラフィによる撮影結果

ここでは、各水準ごとに代表的な一つの試験体の結果を示す。図-9, 12, 15 に気中、飽水、絶乾試験体の測定から得られた水分強度の画像を示す。画像中、色が濃く見える部分が透過率の高い部分、つまり水分が少ない部分である。また、3章の結果より、加熱面から水分が逸散する様子を精度よく捉えることが明らかとなっているが、図-7の関係から、単位体積当たりの水分量に変換することが可能である。

画像の下が加熱面であるが、経時に伴い加熱面付近から乾燥が進んでいることが分かる。また、図-9 気中試験体では爆裂が発生しており、加熱面付近のコンクリートが欠損していることから、爆裂発生前後の水分分布の測定に成功した。気中試験体以外の水準では爆裂は発生しなかった。

図-10, 13, 16 にそれぞれの時刻の画像からイニシャルの画像を差し引いた、差分水分強度の値とした画像を示す。これらは画像間の値の変化量を示しており、水分のみが移動していると、画像の時刻間で移動した水分量に対応する水分強度を表す画像となっている⁵⁾。ただし、前報²⁾で報告したように高温作用により水和物が破壊された場合、脱水した水分の移動も含まれる。同様に、爆裂により欠損した部分については、水分挙動のみを捉えたものではない。

画像中、色が濃く見える部分が乾燥が進んでいる部分を示している。加熱初期は加熱面と並行に乾燥が進んでおり、その後は骨材の界面を介して乾燥が進んでいる様子を捉えることが出来た。

図-11, 14, 17 に、それぞれの測定から得られた結果を、X 軸に加熱面からの距離を取って示す。これは、水分強度、差分水分強度の画像から、加熱面と垂直にそれぞれの深さでの平均値を取ったものである。結果より、加熱開始から加熱面付近の水分が失われているのが分かる。加熱開始 1 分では急激な含水率勾配ができ、時間の経過に伴い緩やかな勾配となる結果となった。

差分水分強度のグラフを見ると、気中試験体では、試験体内部でイニシャルの量を上回る水分があることが分かる。微弱ではあるが、飽水試験体、絶乾試験体でもその傾向は見られた。また、ここでは加熱面から 4cm の位置までしか示していないが、それ以降はイニシャルの水分量と変化がないことを確認した。これは、一瀬ら⁶⁾の実験結果とも一致するものである。

一方、加熱により内部でイニシャルを上回る水分が確認される水分溜りについては、Harmathy⁷⁾や高⁸⁾がその存在に言及しており、著者らの過去の TNRF の実験でも確認されている²⁾。今回の試験において爆裂が発生した気中試験体の差分水分強度のグラフを見ると、爆裂後の水分量は約 3.2cm の位置(図中青矢印)で他の部分より突出して大きい部分がある。爆裂が発生した位置が加熱面から約 1.4cm であり、2cm 程の開きがあるが、水分溜りが存在することで内部への水分の移動が阻害され、爆裂が発生したものと考えられる。爆裂の発生した試験体は 8 つあったが、このように突出して水分の多くなる部分が 3 つの試験体で見られた。

また、爆裂は発生しなかったが、加熱開始 1 分では加熱面から約 3mm 程度の位置まで、3 分では 1cm 程度の位置まで乾燥が進んでいる様子は 3 水準とも一致している。

気中試験体と比して飽水試験体はより内部まで乾燥が進んでいる。これは加熱面付近に水分が多いことで、水分の蒸発にエネルギーを奪われ、コンクリートに与える熱量の減少が起きたと考えられる。これにより、コンクリート内の温度勾配が緩やかになり、水分溜りが出来ずに水分移動が起きたためであると考えられる。

5. 有機繊維混入試験体の実験結果

繊維混入試験体の実験は、繊維を混入したものと、同調合で繊維を入れていないものを比較として用いた。繊維混入試験体と同じ水分状態とするため、水中養生終了後、同じ環境に 3 日間静置した。

ここでも、各水準ごとに代表的な一つの試験体の結果を示

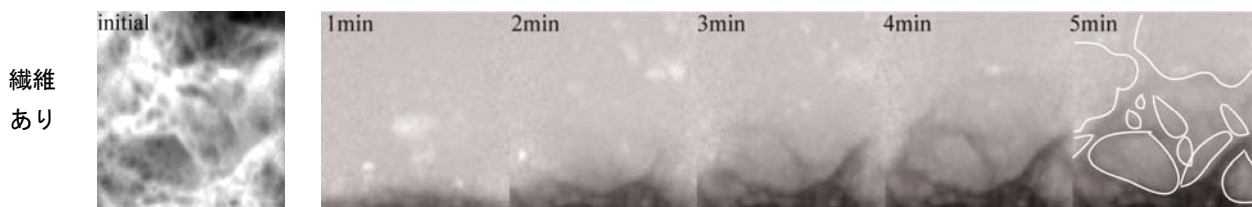


図-18 繊維混入試験体の加熱実験結果（イニシャル：水分強度、経時画像：差分水分強度）

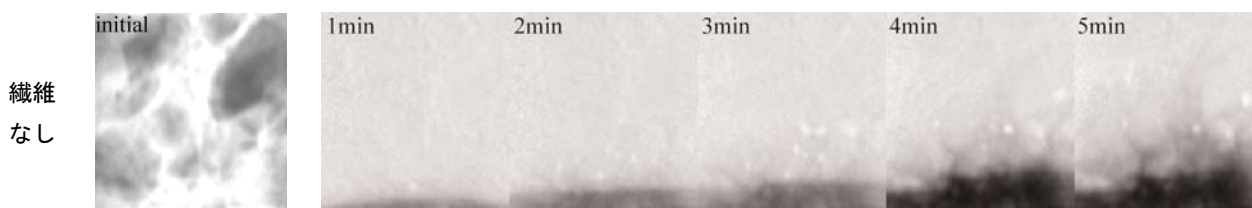


図-19 繊維なし試験体の加熱実験結果（イニシャル：水分強度、経時画像：差分水分強度）

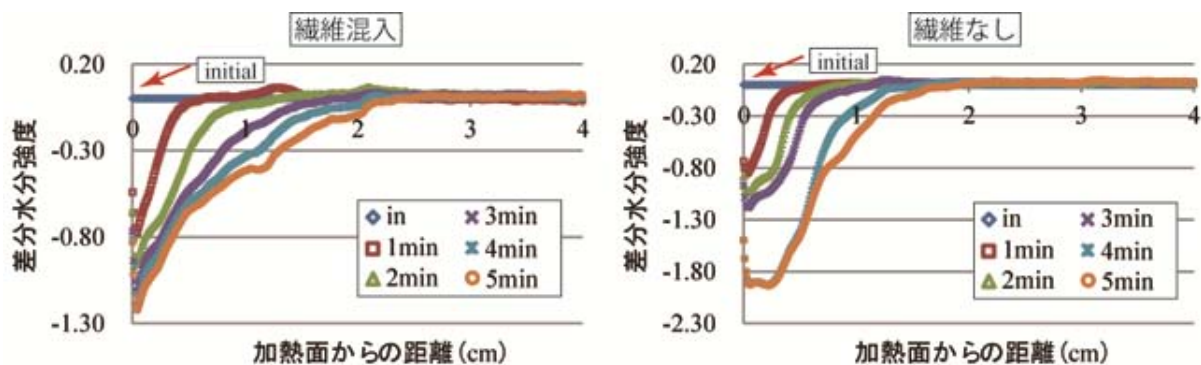


図-20 繊維混入/繊維なし加熱面からの距離と差分水分強度のグラフ

す。図-18 に繊維を入れた試験体の、図-19 に繊維を入れなかった試験体の結果を示す。繊維混入の試験体は、繊維なしの試験体に比べて、より試験体内部まで乾燥が進んでいることがわかる。また、図-18 では、白線で示した骨材界面を介して乾燥が速く進む様子が確認できる。

図-20 にそれぞれの差分水分強度のグラフを示す。繊維なしの試験体では、加熱開始後 5 分で加熱面から 2cm 以上まで乾燥が進んでいるのに対して、繊維なしの試験体は 1.5cm 程度までしか乾燥が進んでいないことがわかる。

繊維なしの試験体では、加熱開始後 5 分で加熱面から 2cm 以上まで乾燥が進んでいるのに対して、繊維なしの試験体は 1.5cm 程度までしか乾燥が進んでいないことがわかる。繊維混入の試験体と図-11 の気中試験体の爆裂が発生する前である 5 分までの水分強度の概形は 2cm 程度まで概ね一致している。しかし、それ以降の箇所については、気中試験体がイニシャルを越える水分量となるのに対し、繊維混入のものは殆ど変化がないことが分かる。繊維混入によって、内外への水分移動が容易となり、過剰な水分凝縮箇所と考えられる水分溜りが発生するのを抑制したことが考えられる。

また、図-20 の繊維混入の図中の 1min の実験結果を見ると、イニシャルの水分量を越える水分を検出している。ここでは繊維の溶解によって、100%を超える水分量を保持でき、爆裂が発生しなかったと考えられる。このような実証的現象により、爆裂が抑制されている可能性があると考えられる。

6. まとめ

- (1) 京都大学原子炉実験所中性子ラジオグラフィ測定により、コンクリート中の水分を定量的に測定可能であることを確認した。
- (2) 透過率から水分強度を得る水分定量法を用いて、高温加熱下でのコンクリート中の水分移動を測定し、爆裂発生前後の水分分布の測定に成功した。
- (3) 高温下での乾燥は、骨材界面を介して乾燥が進むことが分かった。
- (4) 初期含水状態よりも内部の水分が増加する様子を捉え、水分溜りの存在が示唆された。

- (5) 有機繊維混入が高温作用化における水分移動現象に及ぼす影響を精緻に捉えることに成功した。
- (6) 繊維混入による爆裂抑制機構を水分移動現象の観点から説明する基礎的知見を得た。

《謝辞》

本研究に際しまして、京都大学原子炉実験所の川端祐司教授、齋藤泰司准教授には多大なご協力を頂きました。東京大学野口研究室の田村政道氏、東京理科大学の辻石洋平君には実験にご参加頂きました。野口研究室の土屋直子氏には解析のご指導を頂きました。ここに御礼申し上げます。

[参考文献]

- 1) K.D.Hertz: Limits of spalling of fire-exposed concrete, Fire Safety Journal, Vol.38, pp.103-116, 2003
- 2) 榎村剛ら: 高温加熱を受けるコンクリート中の水分挙動に関する研究, コンクリート工学年次論文集 33(1), 1181-1186, 2011
- 3) 兼松学: 中性子ラジオグラフィのコンクリート工学分野への適用に関する研究動向, コンクリート工学
- 4) 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 30(2), 769-774, 2008
- 5) 兼松学ら: 中性子ラジオグラフィによるコンクリートのひび割れ部における自由水挙動に関する研究, セメント・コンクリート論文集, No.61, p160-167, 2007
- 6) 一瀬賢一ら: 火災時の鉄筋コンクリート柱内部の熱・水分移動に関する実験的研究
- 7) T.Z.Harmathy: Effect of moisture on the fire endurance of building materials. No. 385, ASTM, Philadelphia, 74-95
- 8) 高正遠ら: 火災加熱条件下におけるコンクリートの細孔構造の変化と熱・水分移動に関する実験的研究 (鋼・コンクリートの高温時特性, 防火), 学術講演梗概集, 2005, 55-56, 2005-07-31