

# 論文 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

榎村 剛<sup>\*1</sup>・兼松 学<sup>\*2</sup>・土屋 直子<sup>\*3</sup>・飯倉 寛<sup>\*4</sup>

**要旨:** 本研究では、高強度コンクリートの爆裂のメカニズムに関する基礎的知見を得ることを目的とし、非破壊測定装置である中性子ラジオグラフィを用いて、高温加熱下での水分移動現象の定量的解明を試みた。骨材の影響を考察するためのモデル骨材試験体と、水セメント比 25%の高強度コンクリートについて加熱実験を行い、ペースト体積あたりの相対含水率として水分定量を行った。その結果、骨材周りでは他のモルタル部分と比較して水分の乾燥が速いことが確認された。また、加熱の初期段階では加熱表面付近に含水率が大きくなる部分が観測され、水分溜りが発生することが明らかになった。

**キーワード:** 爆裂, 高強度コンクリート, 水分挙動, 中性子ラジオグラフィ

## 1. はじめに

近年、建物の高層化に伴い、高強度コンクリートの需要が高まっている。実際に 150N/mm<sup>2</sup>級のコンクリートが高層建築物に用いられ<sup>1)</sup>、さらに橋梁では 200N/mm<sup>2</sup>の高強度コンクリートを用いた<sup>2)</sup>との報告も見られる。

一方で、火災などによる急激な高温加熱によって発生する爆裂が問題になっている。爆裂が生じると、断面欠損が生じ、露出した鉄筋が加熱されることによる部材の耐力低下が懸念される。現在では、ポリプロピレンなどの繊維を混入するなどの防止策に関する研究も行われ良好な成果を挙げている<sup>(例えば 3)</sup>ものの、その詳細なメカニズムについて必ずしも解明されているとは言えない。

一般的に、コンクリートの爆裂現象は、水分移動現象や、骨材とセメント硬化体間で発生する熱応力、あるいはその両者が原因として挙げられている<sup>4)</sup>。また、近年では水和生成物の分解に伴い発生する水分の影響も無視できないことが指摘されており<sup>5)</sup>、特に、水分挙動に着目した爆裂メカニズムの解明が必要である。

しかしながら、コンクリート中の水分を定量的に測定するには、含水率測定器などの測定器をコンクリート内部に埋設する方法が一般的であるが、測定器近傍に骨材が廻り込まないためペーストリッチになるなど、測定系自体への影響が懸念される。一方、骨材や周辺などに代表される局所における水分挙動の実態を捉えるのは困難であった。

そこで本研究では、非破壊測定技術のひとつである中性子ラジオグラフィにより高温加熱を受けたコンクリート内部の水分挙動の測定を行うことで、爆裂メカニズムに関する基礎的知見を得ることを目的とし、一連の実験を行った。

## 2. 加熱試験概要

### 2.1 中性子ラジオグラフィ装置概要

本研究における中性子ラジオグラフィによる測定は、全て(独)日本原子力研究開発機構の研究炉 JRR-3 炉室内の熱中性子ラジオグラフィ装置 (Thermal Neutron Radiography Facility: 以下 TNRF と略記) 第二撮影室にて行った。

図-1 に TNRF の装置概要、表-1 に測定仕様を示す。本装置は、中性子が物質を透過した際に、原子核との相互作用により生じる中性子の減衰特性の差を利用して、被写体の透過画像を非破壊測定により得る技術である。特に、中性子線は水素原子に対して強い減衰特性を示すことから、水分の定量化に効果的な技術である。

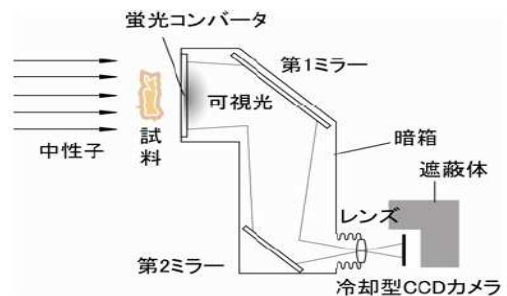


図-1 TNRF 装置概要

表-1 TNRF の測定仕様

中性子束	1.2 × 10 <sup>8</sup> (n/cm/sec)
CCDカメラ	1008 × 1024pixel
取得画素数	(14bits)
空間解像能	約 100 μm/pixel
撮影時間	1.2秒
転送時間	約 8 秒

\*1 東京理科大学大学院 理工学研究科建築学専攻 院生 (正会員)

\*2 東京理科大学 理工学部建築学科 准教授 工博 (正会員)

\*3 東京大学大学院 工学研究科 工修 (正会員)

\*4 日本原子力研究開発機構 量子ビーム応用研究部門 研究員 農博

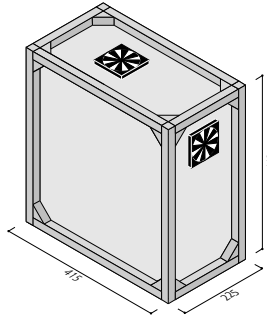


図-2 アルミ容器

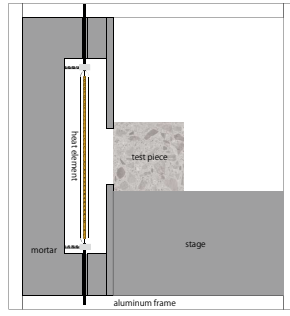


図-3 アルミ容器内断面図



写真-1 加熱装置設置

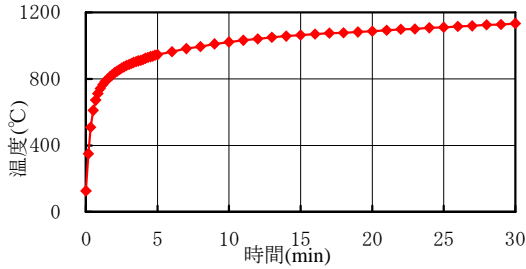


図-4 加熱曲線

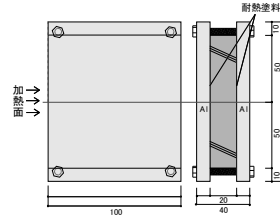


図-5 試験体詳細

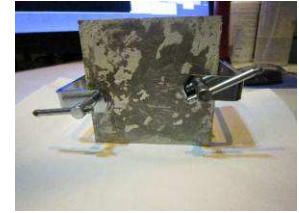


写真-2 試験体

## 2.2 試験方法概要

### (1) 加熱装置概要

本実験では熱源ヒーターを取り付けた装置により、炉室内にて側面から試験体を加熱し、その際のコンクリート内部の水分挙動を測定した。

実験で用いる加熱装置は中性子に対する透過性を考慮し、外面はアルミ製の板材で作成し、ヒーターを収める容器はモルタル製、ステージはコンクリート製とした。特に、照射経路となる部分にはアルミ容器以外の遮蔽物を置かず、試験への影響が可能な限り小さくなるようにした。アルミは中性子線の減衰が少なく、水分定量解析では中性子の透過率で評価するため、測定には影響がないものとみなした。なお、加熱時にはチャンパー周囲(コンバータ、装置の底面等)に熱電対を取り付け、コンバータ等の周辺の機器類へ影響を及ぼさないように温度を監視し、撮影機器への影響がないことを確認した。

加熱は、放熱および爆裂が発生した時の破片の散乱を防止するため、図-2 に示すようなアルミ容器内で行った。また、加熱に際して発生する水蒸気が TNRF 内で結露しないようファンで換気し、シリカゲルに吸水させた。

### (2) 加熱方法

コンクリート柱が火災加熱を受ける状態を模擬し、加熱は側面から行う。試験体、加熱装置、熱源の配置の詳細を図-3 に示す。熱源は近赤外線照射のヒートエレメントを使用した。加熱時はエレメントを3本同時に使用し、加熱源の温度を30分で900℃～1100℃程度まで上昇させた。図-4 にエレメントを用いた時に実測した試験体加熱面直上における温度変化を示す。

### (3) 試験体加工

試験体はモデル骨材試験体と実骨材試験体の2種類について実験を行った。それぞれ、寸法 100×100×20mm (縦×横×厚さ) のものを使用した。打設後 24 時間で脱型、28 日間水中養生の後、切断し、調湿を行った。

調湿は 105℃乾燥によって行った。予め、同調合の飽水時と絶乾時の重量を測定することで、単位重量当たりの自由水量を得た。これを用いて、所定の重量になるように調整した。本研究における含水率とは、コンクリート中に含有することの出来る飽和自由水量に対する自由水量の比を指す。

いずれの試験体も水分の蒸発を防ぐために側面5面を耐熱塗料(主成分:酸化アルミニウム)でシーリングし、照射面2面を厚さ1cmのアルミ板で挟み、ボルト(またはクランプ)で固定することにより、切断面からの水蒸気の逸散を防いだ。試験体の詳細を図-5 に、試験体の写真を写真-2 に示す。耐熱塗料は塗布後、乾燥を待ってから加熱試験を行った

なお、耐熱塗料の温度上昇に伴う質量減少は、700℃で6.8%程度、300℃で5.0%程度であり、主に水分逸散によるものと考えられる。後述するが、加熱30分でのアルミ表面温度は200℃程度であったことから、コンクリートの含水率に対して1割程度の誤差を与えると考える。

## 3. モデル骨材試験体の加熱実験

粗骨材の存在が水分移動にどのような影響をもたらすかを検証するために、円形骨材を使用した試験体の加熱試験を行った。

表-2 モデル骨材調合表

W/C(%)	単用量(kg/m <sup>3</sup> )				混和剤 C×(%)	空気量 (%)
	W	C	S	G		
50	165	330	807	-	0.70	4

: 普通ポルトランドセメント G: 奥多摩産硬質砂岩 S: 大井川水系陸

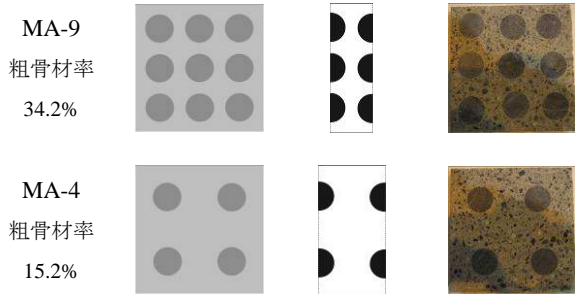


図-6 試験体詳細 写真-3 試験体

### 3.1 試験体詳細

試験体の調合を表-2に示す。ここでは、粗骨材周辺の水分移動についてより深く考察するため、爆裂が発生しにくく、比較的空隙が多く水分移動特性がはっきりわかるW/C0.50とした。

円柱粗骨材は、コアドリルで直径22mmのものを作成し、使用した。粗骨材の配置は図-6に示す通りである。試験体概要を表に示す。粗骨材率は、分割要素の連続となるように配置を決定した。一般的な粗骨材率(MA-9:粗骨材率34.2%)およびその半分程度の粗骨材率(MA-4:粗骨材率15.2%)の2水準を用意した。2cm厚さにカットした後の試験体を写真3に示す。

骨材の縦方向にモルタルを打設したため、ブリーディングの影響は無いものと考えられる。

なお、加熱実験は含水率100%の状態から行った。

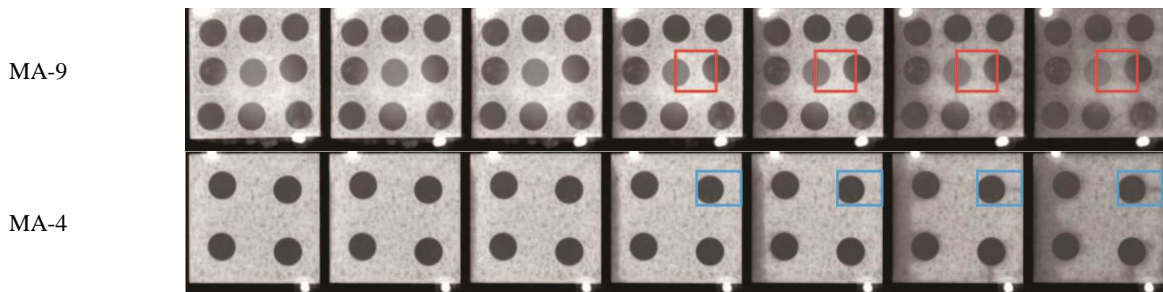


図-7 TNRF 透過画像 (左から加熱開始 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30 分後)

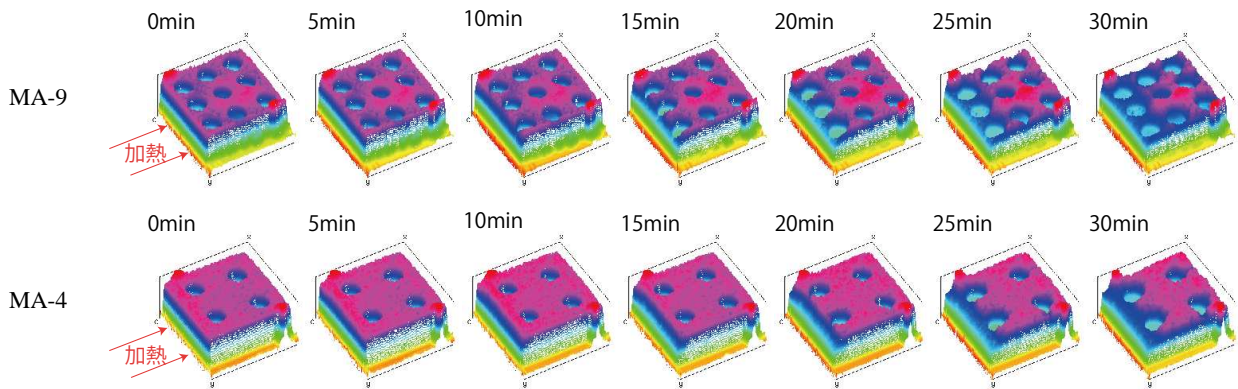


図-8 透過率

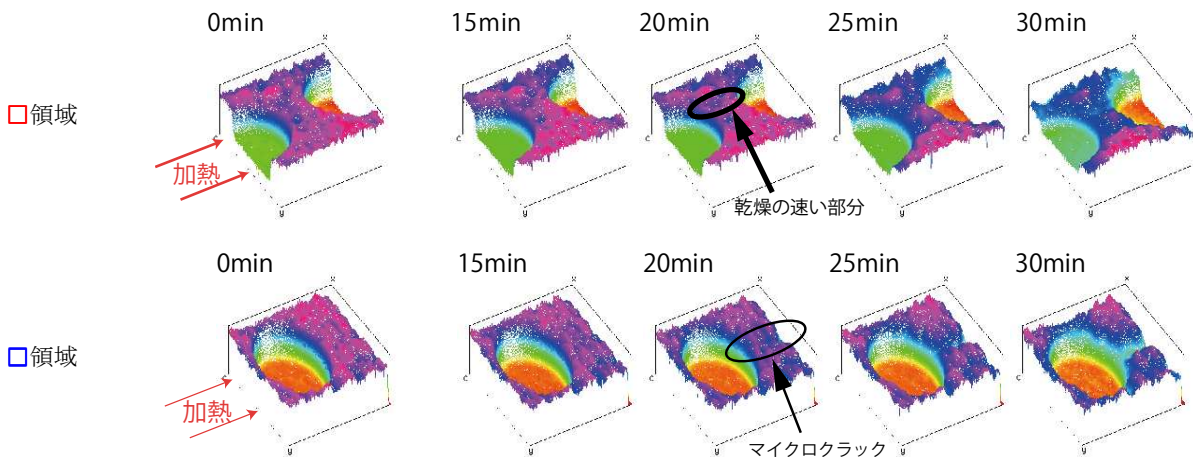
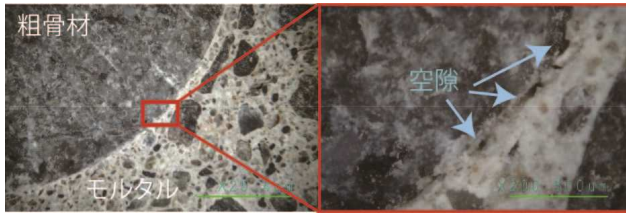


図-9 局所的な水の動き



×25 ×200  
写真-4 骨材周辺のマイクロ撮影写真

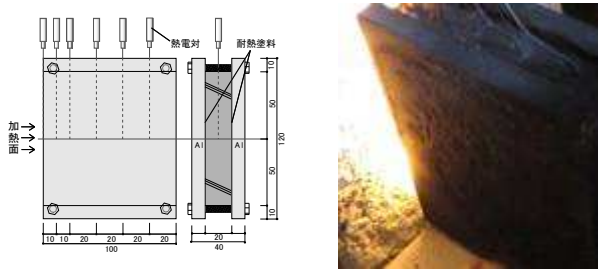
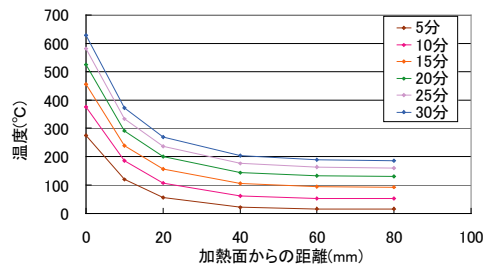


図-10 熱電対埋設試験体詳細 写真-5 加熱の様子

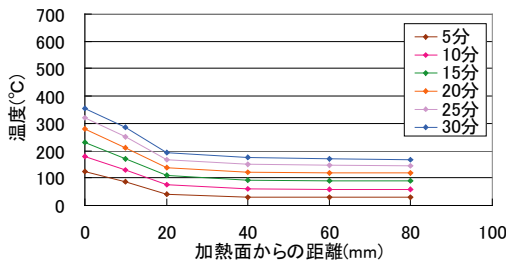
表-3 高強度調合表

W/C(%)	単用量(kg/m <sup>3</sup> )				混和剤 C×(%)	空気量 (%)
	W	C	S	G		
25	165	660	818	821	1.70	1

C: 普通ポルトランドセメント G: 青梅産砕石 S: 大井川水系陸砂



40%



80%

図-11 試験体内部の温度変化



加熱面 割裂面  
写真-6 フェノールフタレイン塗布

### 3.2 試験結果および考察

TNRFによる実験で得られた透過率画像を図-7に示す。画像中の色の薄い部分が透過率の低い部分であり、水が存在している部分である。また、図-7の画像を、z方向を透過率として表したものを図-8に示す。

加熱面より水分が減っていることがわかる。特に、骨材の周辺では乾燥が速く進む傾向が認められた。

また、図-7の、MA-9では赤、MA-4では青の四角で囲った領域の詳細を表したものを図-9に示す。MA-9では隣接する骨材との間で乾燥が速いことがわかる。これより、骨材の多いコンクリートの方が乾燥が速いと考えられる。MA-4では、試験体外部に伸びるマイクロクラックが存在すると考えられ、そこを通じて水分の乾燥が速くなることが認められた。

ここで、骨材周辺で乾燥が速い理由として、骨材周辺に存在する遷移帯の影響があると思われるため、MA-9を切り出した際に出た端材をマイクロで撮影し、縮尺から長さを算出した。骨材周りには帯状で、他の部分よりもペースト分の多い領域が100~120μm程度あり、40~70μm程度の幅の空隙が骨材に沿うように存在する箇所があることが確認された(写真-4)。MA-9の試験体では骨材周辺から伸びるマイクロクラックが連結していると考えられ、マイクロクラックに沿って水分移動が速くなっていることが確認できた。

### 4. 実骨材試験体の加熱実験<sup>7)</sup>

続いて、実際のコンクリート中における、高温下での水分挙動を明らかにするために、実骨材を用いて3章と同様の加熱実験を実施した。初期含水率0, 20, 40, 60, 80, 100%について実験を行った。なお、別途熱電対を埋設した試験体を作成し、温度の影響について検証した。

#### 4.1 試験体概要

実験に使用した、高強度コンクリートの調合表を表-3に示す。

#### 4.2 熱電対埋設試験体の加熱実験

TNRFで得られた含水率分布を分析するために、熱電対を埋設した試験体の加熱実験を行った。熱電対は、図-10に示すように、加熱面から0, 1, 2, 4, 6, 8cmの位置になるよう打設した。加熱試験の様子を写真-5に示す。モデル骨材試験体、高強度試験体と同様、耐熱塗料でシーリングしアルミ板で挟んだ。加熱時は、外部からの温度を測定するため、サーモカメラによる撮影も行った。

また、加熱による内部の組成変化を確認するため、加熱終了後直ちに加熱面に垂直に割裂し、フェノールフタレイン溶液を塗布した。

結果を図-11に示す。コンクリート内部の温度の結

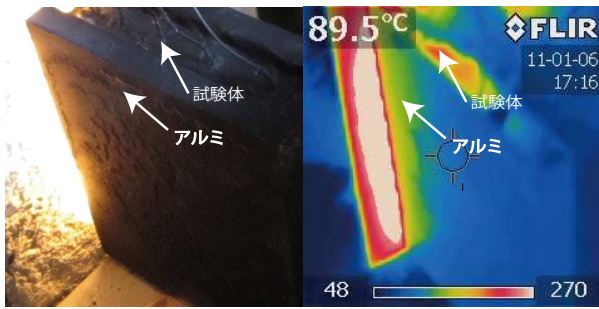


図-12 サーモカメラによる撮画像

果から、微弱ではあるが含水率が低い試験体の温度のほうが比較的上がりやすい傾向が見られた。

フェノールフタレイン溶液の塗布した結果を写真-6に示す。加熱表面は呈色しなかったが、割裂面全域で呈色したため、水和物の分解はそれ程進んでいないことが確認された。

本実験では、中性子の透過を考えて、シーリング材にアルミ板を使用しているが、サーモカメラの結果(図-12)から、アルミ部分がコンクリート試験体よりも50°C程度温度が高くなっていることがわかった。耐熱塗料にある程度の断熱効果が見込まれるものの、外部アルミ部分が熱橋となってコンクリート全体を加熱する影響があった可能性がある。

#### 4.3 TNRFによる加熱実験

水分定量は、骨材の影響をペースト体積あたりの含水率にする手法で解析を行った<sup>6)</sup>。

図-13に透過画像から得られた経時差分画像を、図-14に加熱面からの距離と水分強度の関係を表すグラフをそれぞれ示す。

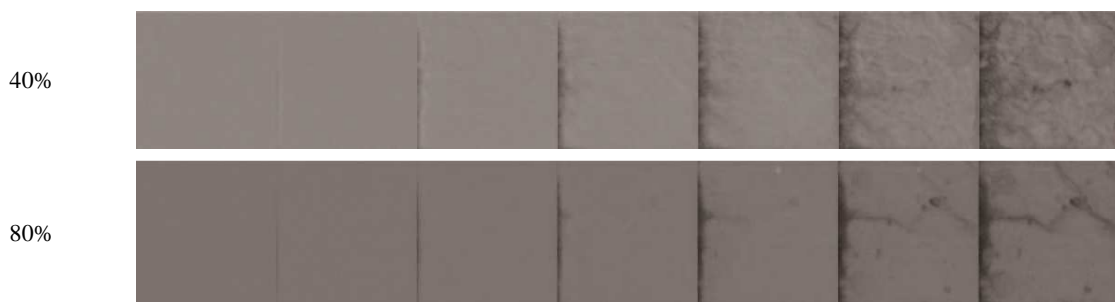


図-13 TNRF 差分画像

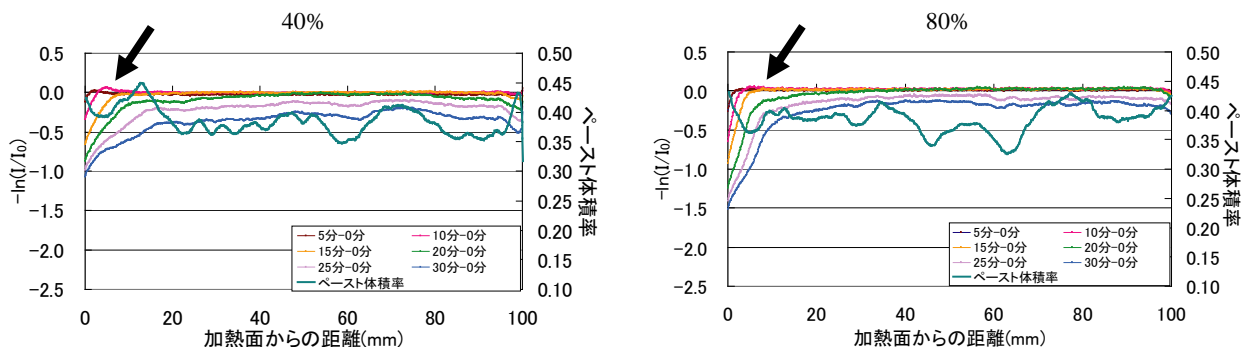


図-14 差分水分強度の経時変化

図-14から、5分で加熱面から2.5mm、10分で5mmの位置(図中矢印で示す)に含水率が高い部分がある。この部分の相対含水率は、初期含水率80%の試験体において5分で約102%、10分で約110%程度、初期含水率40%の試験体で5分で約107%、10分で約113%程度と見積もることが出来た。

これは加熱面付近の水分が熱せられ水蒸気となり、内部はまだ高温でないため冷やされて水分に戻る水分溜りが形成されていると考えられる。

また、15分以降の含水率分布では、このような水分溜りは観測されず、内部も含水率に勾配が出来た。これは、試験体は小型であり、外部に水分が逸散してしまっているためだと考えられる。試験体が加熱面方向に長く、シーリングの方法をより頑丈に行うことができれば、水分の押し出し流れを観測することが出来ると考えられる。

差分画像を見ると、含水率80%の試験体では、マイクロクラックを通じて水分が移動していることがわかる。3章でも述べたような傾向が実骨材試験体でも確認することが出来た。

4.2で行った熱電対埋設試験体と比較したものを図-15に示す。差分水分強度とは、最初の撮画像と、ある時刻の撮画像との差をとったものである<sup>6)</sup>。相対含水率が0%となる差分水分強度値を図中に赤の横線で示す。この値は、図-16で示されるTNRF実測により得たW/C0.25コンクリート試験体の水分強度と含水率の関係から、含水率0%の差分水分強度を算出した。

結果より、加熱から15分でも相対含水率0%の線を越える水分が失われている。100°Cを越すと層間水、結合

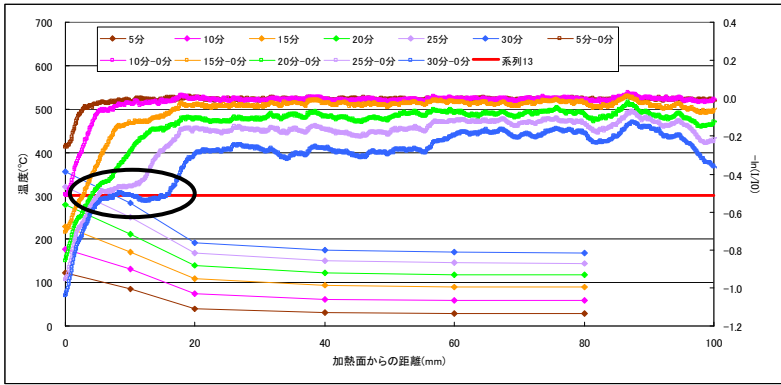


図-15 含水率 100%の温度と含水率の比較

水が抜け始めることが知られているため、これは水和物の分解によるものと考えられる。この結果は、フェノールフタレイン溶液の塗布による結果とは相反するが、塗布してすぐ再水和している可能性もあるため、内部でもこの減少に相当する水和物の分解があることが示唆される。

また、水分の増減が無い領域における温度の結果は 100°C以下であり、逆に 100°Cを越すと水分が減り始めることが分かる。つまり、100°Cになると自由水が蒸発するために、水分が減っているが、100°Cになるまでは結合水と自由水を含む含水量が変わらないことを示唆する。水から水蒸気への状態変化のためのエネルギーに使われるなど、これは、水分及び圧力や温度が常にある状態を保とうとした結果、水分が移動して 100°Cまでは常に一定量を保持することを示唆している。

また、加熱から 20 分付近から図中の赤線に沿って水分強度の変化が収束する(図-15の丸で囲った部分)特徴があり、グラフが収束し始めるときの温度が大体 230°Cである。つまり、温度が 230°C付近で含水率が 0%のまま停滞していることを示す。また一方で、温度勾配は直線的であるが、本研究での測定は 10mm 間隔での測定であった。そのため、温度 230°Cまでは自由水及び結合水が温度の上昇と共に乾燥するが、230°Cを付近で、何かしらのエネルギーに変換していることが示唆される。

加熱面より奥側では 100°Cを越えても相対含水率が高い部分がある。押し出し流れがあるならば、押し出された水分がそこにとどまっている可能性が考えられるので、相対含水率が高い状態にあると考えられる。

## 5. まとめ

本研究では火災を模擬した高温加熱実験を TNRF で測定し、高温加熱下での水分移動現象を測定した。得られた知見を以下に示す。

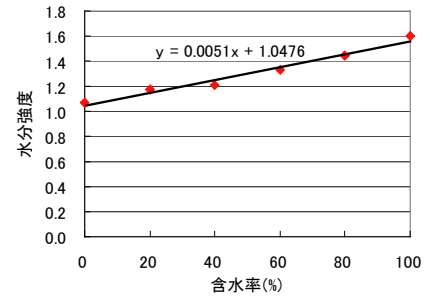


図-16 水分強度と含水率の関係

- (1) 加熱開始から 10 分程度までは、加熱面近くに水分溜まりが発生する。
- (2) 遷移帯、マイクロクラックでは乾燥が他の部分よりも速く進み、これらが連続していると、そこを介して外部に逸散する。
- (3) 加熱による内部の温度変化は含水率によって異なり、含水率の高いものほど上がりにくい。
- (4) 高温下におけるコンクリート中の水分分布を詳細に得ることができた。その結果、結合水の乾燥が示唆され、そのため、水分濃度の分布は線形的な濃度勾配ではないことが明らかとなった。

## 《参考文献》

- 1) 陣内浩, 早川光敬, 黒岩秀介: 実用化を迎えた設計基準強度 150N/mm<sup>2</sup> 級超高強度コンクリートの性能
- 2) 下山善秀, 武者浩透, 中村裕: 酒田みらい橋プロジェクト: 200N/mm<sup>2</sup> 級セメント系新素材ダクトルを用いた国内初の PC 歩道橋
- 3) 三井健郎, 米澤敏男, 小島正朗, 三橋博三: 設計基準強度 80~120N/mm<sup>2</sup> 超高強度コンクリート柱の耐火性能に及ぼす有機繊維および鋼繊維の影響に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 75 巻, 第 648 号, 461-468, 2010 年 2 月
- 4) 森田武: コンクリートの爆裂とその防止対策, コンクリート工学 45(9) pp.87-91 2007
- 5) Lucia Alarcon-Ruiz ら: The use of thermal analysis in assessing the effect of temperature on a cement paste, Cement and Concrete Research 35, 609-613, 2005
- 6) 土屋直子, 兼松学, 野口貴文, 飯倉寛: 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
- 7) 米澤敏男, 三好徹志, 松下哲郎, 川尻聡: 火災を受ける高強度コンクリート中の水による圧力と損傷機構, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, 2010