

論文 高温加熱を受けるセメント硬化体の脱水を考慮した水分挙動の爆裂への影響に関する研究

兼松 学*1・中野 昌宏*2・田村 政道*3

要旨: 本研究では、高強度コンクリートに発生する爆裂現象のメカニズム解明を目的とし、加熱過程における水分挙動や応力形成の要因を推定するため、中性子ラジオグラフィを用いた加熱実験の測定、およびTG-DTAによる水分挙動の予測を行い、試験体温度が200℃前後の部分に水分が凝縮する現象(水分だまり)を観測した。また、セメント硬化体の脱水現象が水分挙動に及ぼす影響を観測するため、モルタルを用いた加熱実験の測定を行い、水分だまりでは加熱前の含水率によらず飽和に近い状態まで水分が凝縮していることや、水分だまりの形成にはセメント硬化体中のゲル構造の脱水が影響していることが推測された。

キーワード: 爆裂, 中性子ラジオグラフィ, 水分挙動, TG-DTA, 高強度コンクリート, モルタル

1.はじめに

コンクリートは、火災等による高温加熱を受けた際に、急激な応力発生により表面が剥離・飛散する爆裂現象を生じることがあり、爆裂が発生すると断面欠損や鉄筋の露出などによる部材の耐力低下につながる。特に近年高層建築物において需要が増加している高強度コンクリートは、普通コンクリートと比べ、爆裂現象が発生しやすいとされる¹⁾。こうした背景を受け、近年では爆裂発生メカニズム²⁾や防止法^{例えぼ 3)}に関する研究が盛んに行われ良好な成果を得ているものの、そのメカニズムが完全に解明でき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²⁾。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⁴⁾、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。

著者らの研究⁵⁾では、中性子ラジオグラフィ(Thermal Neutron Radiography Facility:以下 TNRF と略記)により、高温加熱過程における高強度コンクリート内部の水分挙動を非破壊で測定し、爆裂へと至る乾燥過程での水分挙動をとらえることに成功した。また、加熱による水和物の分解の可能性も示唆された。しかしながら分解された水和物の定量や粗骨材影響に対する考察が不

十分など、課題も多かった。

そこで本研究では、TG-DTAによるセメント硬化体の加熱による組織の変化とTNRFによる高強度コンクリート及びモルタルを用いた加熱時の水分挙動の観測結果を比較し、加熱に伴うコンクリート内部の水分挙動をより精緻に分析することを目的とする。

2. コンクリート試験概要

2.1 コンクリート試験体

本研究で用いたコンクリートの調査表を表-1に示す。試験体は、打設後24時間で脱型し、7日間水中養生を行った後、100×100mm面を切断面として100×100×20mmの試験片を得た。試験体の含水状態は、爆裂発生が確認された気乾状態(水中養生後20℃60%RH環境下にて1ヵ月静置)のものを使用した。また、セメントには早強ポルトランドセメントを使用した。混和材はシリカフェームを、細骨材は佐野産砕砂(絶乾密度2.59g/cm³, 吸水率1.32%)、粗骨材は青梅産硬質砂岩砕石(絶乾密度2.63g/cm³, 吸水率0.67%)を用いた。

2.2 TG-DTAによる熱物性の測定

加熱にともなう試験体の脱水をより詳細に分析するため、TG-DTAを用いてコンクリートの温度と質量減少量の関係を求めた。

試料には、加熱実験と同バッチのコンクリートを使

表 - 1 コンクリート調査表

W/B (%)	W/C (%)	W (kg/m ³)	B		S (kg/m ³)	G (kg/m ³)	高性能 減水剤 (B×%)	消泡剤 (B×%)	空気量 (%)
			C (kg/m ³)	混和材 (kg/m ³)					
18.0	20.0	160.0	888.9		425.0	1060.2	2.7	0.7	2.0
			800.0	88.9					

*1 東京理科大学工学部建築学科 准教授 工博 (正会員)

*2 東京理科大学大学院

*3 東京大学大学院工学系研究科

用し、前処理として、水和を止めるためにアセトン浸漬を 24 時間行い、24 時間真空脱気で乾燥させた後、窒素雰囲気下で粉碎し、粒径が 50 μm 以下のものだけを分級して使用した。測定はいずれも窒素雰囲気下で昇温速度 10°C/min で行った。

TG-DTA による、コンクリートの温度と質量変化の関係を図 - 1 に示す。本研究では、あらかじめ求めた水酸化カルシウム及び炭酸カルシウムの反応温度より、600°C以下の範囲で起きる質量減少をすべて水分の散逸によると仮定した。

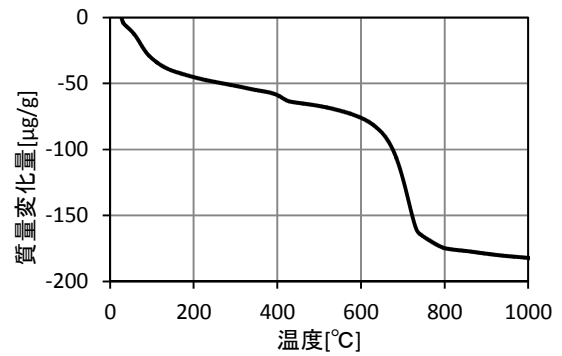


図 - 1 TG-DTA による温度と質量変化の関係

2.3 加熱試験および TNRF 実験概要

本研究における TNRF の測定はすべて京都大学原子炉研究所の研究用原子炉の B-4 ポートにて行った。中性子線の入射中性子束は 1MeV 運転時で $1 \times 10^7 \text{ n/cm}^2$ 、空間分解能は約 100 μm/pixel である。

試験時の装置配置図を図 - 2 に示す。試験体は加熱最中のずれや側面に回り込んだ火炎からの加熱を防ぐため、側面にアルミ製のブランケットを敷き図 - 3 に示すアルミ製の治具で固定した。

隔は 20mm とした。ガスバーナーによって得られた試験体底面における加熱曲線(KUR 2013 と表記)を図 - 4 に示す。参考として、ISO 834 標準加熱曲線および RABT(「道路トンネル内の施設と交通に関する規制」(ドイツ交通省道路建設部))加熱曲線を示す。

また、加熱実験とは別に、TG-DTA による昇温過程における試験体の質量変化量を求め、加熱中にコンクリートより抜ける水分量を仮定し、TNRF の結果と比較した。

また、一部の試験体では打設時に加熱面から 20, 40, 60, 80mm の箇所に熱電対を埋め込み、試験中の温度を測定した。

2.4 結果および考察

本試験における加熱はすべてガスバーナーによって行い、試験体の底面(加熱面)とガスバーナー上端の間

過去の著者らの研究⁵⁾と同様の方法により、図 - 5 に示す中性子透過率と体積含水率の関係を求めた。

TNRF の試験により得られた透過画像のうち、あら

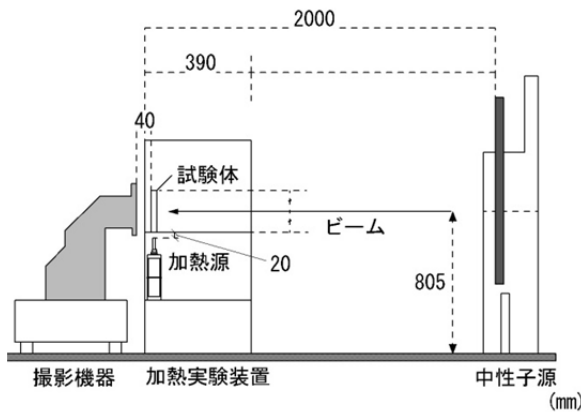


図 - 2 装置配置図

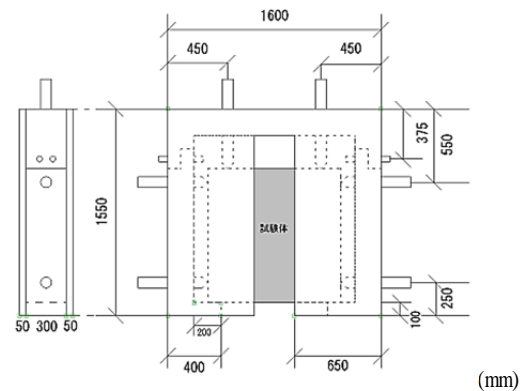


図 - 3 アルミ製拘束治具

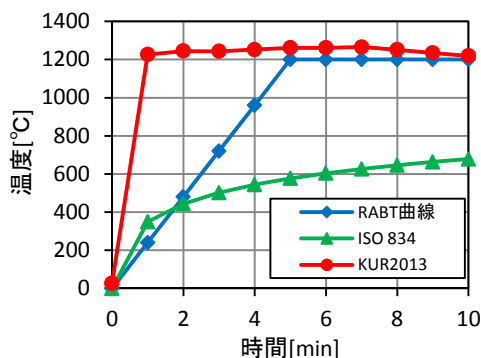


図 - 4 試験体底面の加熱曲線

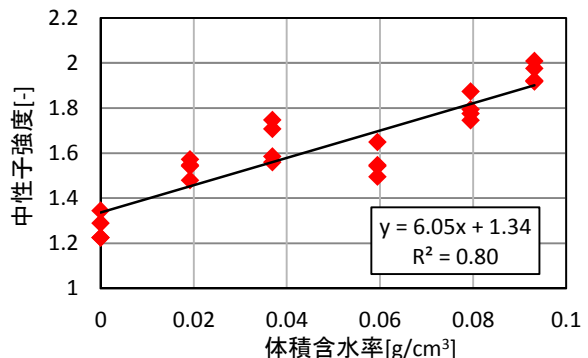


図 - 5 コンクリートの透過率と体積含水率の関係

はじめ測定精度を検証し中央の 20×100mm を切り出したものを図 - 6 に、コンクリート中の単位ペースト量あたりの水分と温度の変化、および TG-DTA から予測した水分変化量を図 - 7 に示す。

透過画像は、左端が初期状態の画像であり、それ以外の画像は、各時刻の画像から初期状態を差し引いた差分画像である。画像の輝度と含水量は線形関係にあり、画像は黒い部分に水分が多く、時間経過とともに底面から乾燥していく様子が確認できる。また、乾燥は内部の骨材界面に沿って進行していく。

加熱に伴い、内部温度の上昇がみられるが、高さ 20mm までは温度勾配が急激だが、20mm より高い部分では温度勾配が緩やかになる傾向が見られた。爆裂は加熱開始から 3~8min の間に断続的に発生しており、0~10mm 間の水分が 2min とそれ以降では大きく異なることから、爆裂によって水分が大きく動いたことが観測された。

前述の TG-DTA の測定結果から、600℃以下の質量減少を水分の減少によるものと仮定し、各時刻の温度と比較することで水分変化量を推定し、TNRF により測定した水分挙動と比較検討した。従って、内部温度が 600℃を超える高さ 10mm 以下の領域は検討の範囲外とした。内部温度が 200℃を超える範囲では実測値と予測値がおおむね一致しているが、温度が 100~200℃の範囲にある 20~40mm の領域で実測値と予測値に差がみられた。これは、下部領域で発生した水蒸気が上部に移動して 100℃の領域に達し、冷やされることで液水として凝縮したためと考えられる。一部 100℃を超えていると思われる範囲に液水が存在する理由としては、部位による温度ムラ・組織ムラが存在するか、あるいは凝縮水により水蒸気の移動が妨げられなどして一時的に高圧状態にあるためと推察される。

3. モルタル試験概要

3.1 モルタル試験体

本研究で用いたモルタルの調合表を表 - 2 に示す。試験体は、中性子の透過率を考慮し、50×100×5mm のサイズに打設したものを、7 日間水中養生の後、所定の含水状態に調整したものを使用した。セメントには、早強ポルトランドセメントを使用した。

モルタルの加熱試験では、組織構造の差が水分挙動に与える影響を考察するために、3 種類 W/C(20, 35, 55%)を用意した。また、試験時の試験体の含水率は、飽和(水中養生直後と同重量になるまで吸水)、気乾(水中養生後、20℃60%RH の環境下で 10 日間静置)、絶乾(水中養生後 1 週間真空乾燥)の 3 種類を用意した。なお、真空乾燥は、通常用いられる高温乾燥(105℃や 60℃

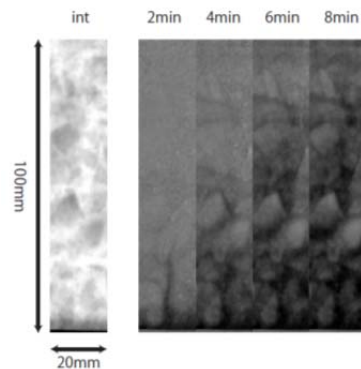


図 - 6 コンクリートの透過画像(左) および差分透過画像(右)

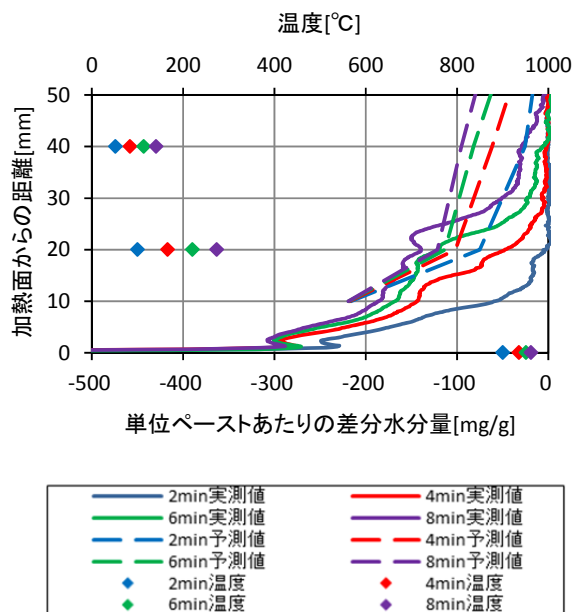


図 - 7 コンクリートの温度と水分分布の変化

表 - 2 モルタル調合表

W/C	水	セメント	細骨材
[%]	[kg/m ³]		
20	286.4	1432.1	695.2
35	412.6	1178.9	542.3
55	524.7	954.0	436.1

前後が一般的)に比して乾燥程度が小さいが、組織へのダメージを減らすことおよびTG-DTA の乾燥条件に近づけることを目的として絶乾と定義した。

3.2 加熱試験および TNRF 実験概要

2 章より、TG-DTA と TNRF から加熱によるコンクリートの水分挙動を比較し、予測値と実測値に差がみられたが、その原因解明までは至らなかった。そこで、粗骨材影響を受けず内部が均一とみなせるモルタルを用いて加熱実験を行い、より精緻な水分挙動の分析を行った。

装置配置図は図 - 2 と同様とし、試験体周辺を図 - 8 のように変更した。試験体は、側面からの水分の散逸を防ぐためにアルミ板およびアルミナ板ではさみ、試験体とアルミ板の間に隙間を作らないよう、試験体表面に耐火ボンドを塗って平滑にした。加熱実験中にアルミ板が剥離しないよう、左右から万力でアルミ板と試験体を密着させた。また、試験体側面に回り込んだ火炎からの加熱を防止する目的で、試験体下面に加熱用の開口を開けた耐火煉瓦を下に敷き、加熱が1次元的に行われるようにした。

本実験では、試験体厚さが薄いため、表面温度と内部温度はほぼ同値とみなし、加熱に伴う試験体内部の温度変化を測定するため、試験体表面の加熱面から10, 20, 40, 60, 80, 100mm の位置に熱電対を取り付け、表面温度を測定した。なお加熱面は型枠面である。

3.3 結果および考察

コンクリートと同様の手法で求めたモルタルの中性子強度と体積含水率の関係を図 - 9 に示す。

図 - 10 に TNRF により得られた透過画像および差分透過画像を示す。

図 - 10 の各図(a1~c3)は、左端が初期状態の画像であり、それ以外の画像は、各時刻の画像から初期状態を差し引いた差分画像である。初期画像は白い部分が細骨材であり、それ以外の部分がセメント硬化体である。差分画像は、水分が増加した部分が白く、水分が減少した部分が黒くなっている。尚、画像の下側が加熱面である。

W/C が 20% の絶乾試験体の差分画像は全体的に白くなっているが、これは最初に加熱した試験体であり、試験時に試験体の下部に設置した耐火煉瓦から蒸発した水蒸気が試験体下面から供給され、試験体内部で凝縮したためと考えられる。従って、2 回目以降に測定した W/C20% 絶乾以外の試験体では同様の現象は確認できなかった。いずれの試験体においても加熱面から徐々に黒くなっており、乾燥していく様子がとらえられた。また、含水状態で比較すると絶乾、気乾、飽和

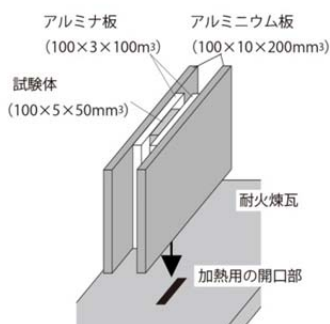


図 - 8 モルタル試験体設置概要図

の順に乾燥が進むのが速かったが、W/C による乾燥速度の違いは見られなかった。

図 - 10 より、絶乾(図 a2・3)・気乾(図 b1~3)の試験体では、透過差分水分画像において水分が増加している(白くなっている)部分が時間経過とともに上昇している様子が観測できる。これは下から熱せられた水分が集まってできた水分だまりが温度上昇にともない上部へ移動しているものと考えられる。一方、飽和の試験体(図 c1~3)では水分だまり(水分が増加している箇所)がはっきりとは観測できなかった。

また、試験体によっては(図 a1,a2,b1,b3,c1)画像の底面付近も水分が増加して(白くなって)おり、熱せられた水分が上部だけではなく、下部にも移動する様子が観察できた。

次に、加熱開始からの単位ペーストあたりの水分量と試験体表面温度の時間変化のグラフを図 - 11 に示す。図中に示した黒の実線、波線はそれぞれ、試験時から飽和、絶乾までの単位ペーストあたりに生じる水分の質量差である。

図 - 11 より、液水の付着により温度上昇が抑制された W/C20% の試験体を除けば、水分だまりはいずれも温度が 100℃ になっている部分の直上にあり、試験体の温度上昇とともに上部に向かって移動していく現象が観測された。さらに、W/C が低い試験体に形成された水分だまりでは、試験体の加熱前の含水率に抛らず、飽和近傍まで水分が存在している。W/C35% 気乾の試験体では、90 秒から 120 秒までの間に急激に水分量が増加している様子が観測された。また、爆裂には至っていないが、水分が増加したと思われる領域で試験体を貫通するひび割れが発生していたことが観測され、この急激な水分量の増加が爆裂に寄与しているのではないかと推察される。

また、底面からの乾燥は絶乾の線を大きく超えて生じている。これは、加熱によってセメント硬化体中の組織が脱水反応を起こしたためであると考えられる。

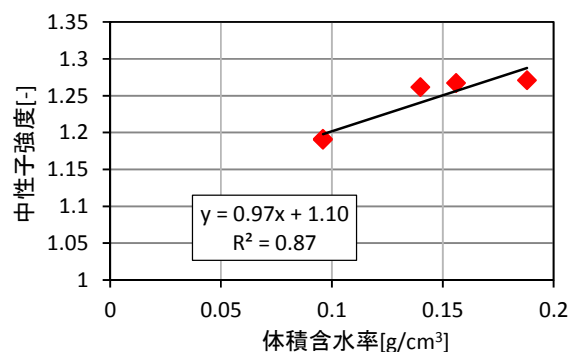


図 - 9 モルタルの透過率と体積含水率の関係

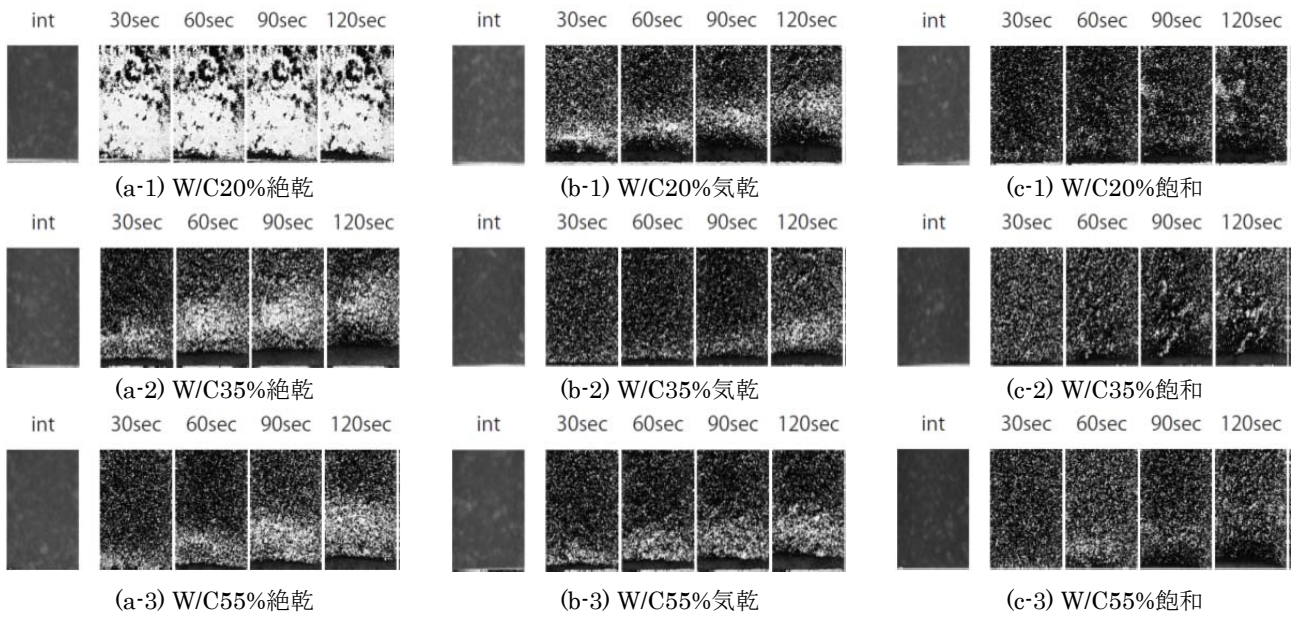


図 - 10 透過画像および差分透過画像(各水準の(int)は初期透過画像, 各時刻は差分透過画像) (下側が加熱面)

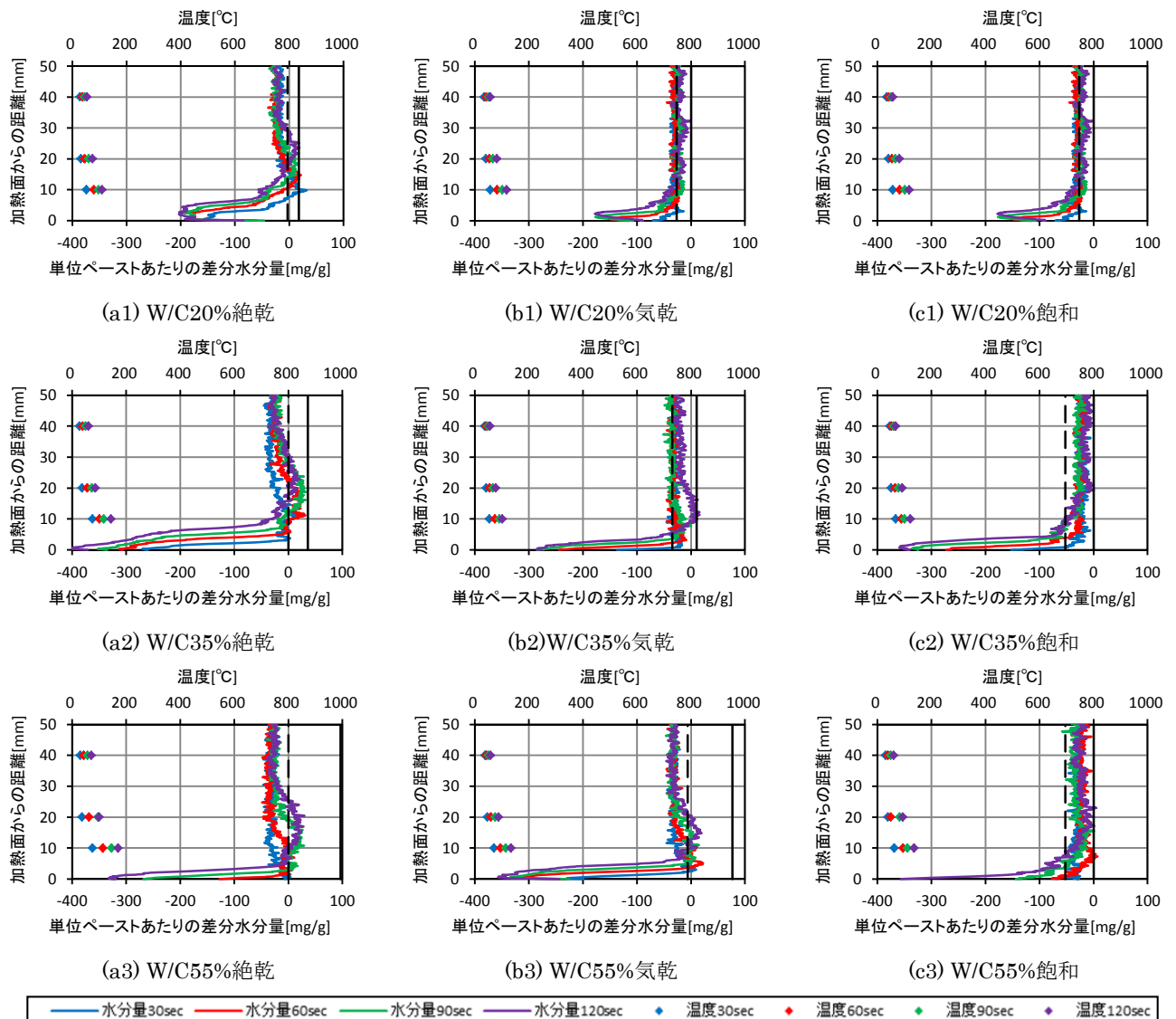


図 - 11 水分量と温度の変化

表 - 3 TG-DTA による質量減少量

試験体	W/C20 気乾			熱解析	W/C35 気乾			熱解析	W/C55 気乾		
	温度範囲	20~300℃	330~500℃		550~800℃	温度範囲	40~350℃		350~550℃	550~800℃	温度範囲
解析項目	ゲル組織	Ca(OH) ₂	CaCO ₃	解析項目	ゲル組織	Ca(OH) ₂	CaCO ₃	解析項目	ゲル組織	Ca(OH) ₂	CaCO ₃
単位	[mg]	[mg]	[mg]	単位	[mg]	[mg]	[mg]	単位	[mg]	[mg]	[mg]
加熱前	0.84	0.27	1.23	加熱前	1.12	0.35	1.14	加熱前	1.24	0.41	1.16
0mm	0.11	0.20	1.30	0mm	0.79	0.36	1.16	0mm	0.36	0.34	1.21
10mm	0.40	0.23	1.30	10mm	0.80	0.41	0.79	10mm	0.58	0.38	1.04
20mm	0.50	0.19	1.34	20mm	0.87	0.38	1.09	20mm	0.55	0.36	1.08
40mm	0.59	0.19	1.40	40mm	0.92	0.41	0.89	40mm	0.78	0.37	1.30
60mm	0.54	0.27	1.23	60mm	0.86	0.42	1.00	60mm	0.69	0.39	1.25
80mm	0.66	0.25	1.41	80mm	0.76	0.42	0.87	80mm	0.70	0.38	1.05
100mm	0.59	0.22	1.42	100mm	1.21	0.41	1.11	100mm	0.88	0.36	1.16

※試験体 10mg に対する各温度での質量減少量。

3.4 TG-DTA による脱水物の推定

加熱実験において観測されたセメント硬化体の脱水をより詳細に分析するため、TG-DTA を用いて脱水物の推定を行った。加熱実験で測定した試験体の加熱面から 0, 1, 2, 4, 6, 8, 10cm 箇所と加熱前の試験体を用い TG-DTA により、加熱によるモルタルの組成変化を分析した。

加熱前の試験体には、加熱試験と同バッチのものを使用し、試験体全域から試料を採取した。加熱後の試験体は、加熱実験終了後、外気からの水分の供給による再水和を防ぐため、加熱実験終了後にシリカゲルと一緒にデシケータ内で冷却した後、真空パックに封入して外気と遮断した状態で保管したものを使用した。試料は、加熱面から 0, 10, 20, 40, 60, 80, 100mm の領域から採取した。

試料の採取方法および前処理はコンクリートと同様である。測定はいずれも窒素雰囲気下で昇温速度 10℃/min で行い、文献⁶⁾とあらかじめ行った予備試験を参考に、20~300℃をゲル組織、330~500℃を水酸化カルシウム、560~800℃を炭酸カルシウムの脱水・脱炭酸領域と仮定し、各領域における質量減少量を比較した。水酸化カルシウム、炭酸カルシウムは質量減少量から質量を求めることができるが、CSH ゲルは組織構造が複雑であるため、具体的な重量を求めることが困難である。そのため、本論文では、一律に評価するためにあえて質量減少量のままで議論することとした。

表 - 3 に各 W/C の気乾状態の試験体での高さ毎の TG-DTA の測定結果を示す。各試験体ともに、水酸化カルシウム、炭酸カルシウムの量は加熱前と比べ、変化しておらず、加熱実験による水酸化カルシウムの脱水、炭酸カルシウムの脱炭酸は起きなかったと判断される。しかしながら、ゲル組織の反応領域の質量減少量は、加熱面に近いほど減少している。そのため、爆裂発生に寄与すると考えられる水分は、主に CSH をはじめとするゲル組織の脱水が支配的だと考えられる。

4. まとめ

本研究によって得られた知見を以下にまとめる。

1. 加熱に伴い加熱面から乾燥の様子をとらえ、内部温度が 200℃前後の部分に水分が凝縮している現象をとらえた。
2. モルタルを用いた加熱実験により、W/C が低い試験体では水分だまりが形成され、飽和に近い状態まで水分を含むことを観測した。
3. 水分だまりを形成する水分は、セメント組織中のゲルの脱水により発生した水分であると推測される。

謝辞

本研究は科研費 若手研究 (A) 24686064(2012 年度~2014 年度)の助成を受けたものである。

実験に当たり、京都大学原子炉研究所の齋藤泰司准教授に協力いただいた。記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 池尾陽作：高強度コンクリートの耐火性能(爆裂)に関する研究，コンクリート工学，vol.37，No.8，pp.53~57，1999
- 2) 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，vol.45，No.9，pp.87-91，2007
- 3) 木村和広他：繊維補強コンクリートの爆裂性状と内部蒸気圧との関係，コンクリート工学年次論文集，vol.30，No.1，pp.339-334，2008
- 4) Lucia Alarcon-Ruiz 他：The use of thermal analysis in assessing the effect of temperature on a cement paste，Cement and Concrete Research 35，pp.609-613，2005
- 5) 榎村剛他：高強度コンクリートの爆裂時の水分挙動に関する研究，コンクリート工学年次論文集 vol.34，No.1，pp.1108-1113，2012
- 6) コンクリートの高温特性とコンクリート構造物の耐火性能に関する研究委員会 報告書，日本コンクリート工学会，2012.5