

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 26 日現在

機関番号：32660

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2012～2013

課題番号：24686064

研究課題名(和文) 局所水分の評価を基軸とした高温作用環境下におけるコンクリートの挙動解明

研究課題名(英文) Experimental research on the physicochemical behavior of high strength concrete in high temperature environment by using the TNRF focusing on the local moisture behavior

研究代表者

兼松 学 (KANEMATSU, MANABU)

東京理科大学・理工学部・准教授

研究者番号：00312976

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 20,500,000円、(間接経費) 6,150,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、完全非破壊測定手法である中性子ラジオグラフィによる局所水分挙動の解明を軸として、高温作用下におけるコンクリートの熱水分移動・圧力形成・変形メカニズムを解明することを目的とし、一連の実験的研究を実施した。一連の実験的研究により、コンクリートの加熱環境下および爆裂前後における水分状態を捉えることに成功するとともに、定量化手法により得た水分分布から、加熱時における水分溜りの形成および水分溜りの移動現象を捉えることができた。これら成果の分析により、水分ダマリの形成のメカニズムは、加熱により移動した水蒸気が低温領域で再凝集した結果であることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：The physico-chemical process of the spalling phenomena is assumed to be due to the moisture pressure build-up inside the pore structures, restrained thermal interaction or simultaneous action of both. Also, it can't be ignored that the influence of dehydrated water under high temperatures from cement hydrate, such as CSH and calcium hydrate.

In this research, we applied neutron radiography to detect the hydraulic behavior under high temperatures to understand the spalling phenomenon of high strength concrete, focusing on the difference of mix proportions and dry conditions. The moment of spallation of ordinary concrete can be observed by the neutron radiography, and the moisture behavior under the fire condition can be examined by the intensity analysis of the images. And also, the result by TNRF clearly showed that water condensed as moisture clog in the region at a temperature of 100 degrees Celsius.

研究分野：建築学

科研費の分科・細目：建築学・建築構造・材料

キーワード：中性子ラジオグラフィ 高強度コンクリート 爆裂 水分挙動

1. 研究開始当初の背景

コンクリート構造物において温度作用が問題となる事象としては、近年高層集合住宅を中心として利用が拡大している高強度コンクリートに想定される爆裂現象や、作用温度が厳しいとされているトンネル火災などが挙げられる。また、特殊な事例では、今回震災で原子力格納容器が長期にわたり高温下に置かれたことが報告されており、いずれも災害時のリスクと直接深く関係しており過少視することはできない。

コンクリートに対する高温作用の影響は、熱の移動や、水分移動、応力状態、セメント水和物をはじめとする組織の破壊など多岐にわたり、古くから多くの研究がなされてきている。なかでも、コンクリートの爆裂現象は、急激な温度上昇に伴う水蒸気圧の上昇、骨材とセメントマトリクス間に生じる熱応力、あるいはその複合作用により生じることが知られており、これらの現象解明に向けた多くの研究がなされてきた。しかしながら、近年では水蒸気圧説を棄却する報告がなされたり、水酸化カルシウムの分解に伴う水分の寄与が指摘 2)、 e)されるなど、詳細なメカニズムに関しては未解明な点が多い。

一方で、建築においては耐火被覆や有機系繊維による爆裂抑制対策が取られているものの、近年、多様化する材料・調合を適切に評価するには、メカニズムの解明によるより理論的な検証方法の充実が望まれている。したがって、高温作用下におけるコンクリートの熱水分移動・圧力形成・変形メカニズムを解明する学術的必要性は高く、材料・調合等各種因子の影響について評価し、鉄筋コンクリート造構造物の災害時危険度評価に資する基盤的知見の整理につながることを期待される。

2. 研究の目的

コンクリートを損壊する作用のひとつとして火災などの高温作用が挙げられる。近年では、高強度コンクリートの爆裂現象などが問題となっているが、高温下でコンクリートに生じる現象の補足は容易ではなく、そのメカニズムは未だ不明なところが多い。

本研究では、完全非破壊測定手法である中性子ラジオグラフィによる局所水分挙動の解明を軸として、高温作用下におけるコンクリートの熱水分移動・圧力形成・変形メカニズムを解明することを目的とする。さらに、材料・調合等各種因子の影響について評価するとともに、鉄筋コンクリート造構造物の災害時危険度評価に資する基盤的知見の取得を最終目的とする。

3. 研究の方法

(1) 概要

本研究では、完全非破壊定量化技術である中性子ラジオグラフィ (Neutron Radiography NR) を基軸とし、NR による局所水分挙動の測

定と同時に、容器の応力状態および温度・圧力分布を測定し、高温下における熱水分挙動および応力状態の解明を目指す。

研究は大きく分類して、(1) 各種物性試験 (事前試験・加熱後試験)、(2) 予備加熱中性子適用実験、(3) 通常加熱実験、(4) 加熱中性子適用実験として実施した。

(2) 使用材料および調合

研究で用いた使用材料及び調合の例を表 1 およびコンクリートの調合を表 2 に示す。

試験体は全て、打設後 24 時間で脱型し、7 日間水中養生を行った後、100×100×20mm<sup>3</sup> に切断した。試験体の含水状態は、飽水状態 (水中養生)、気乾状態 (水中養生後、20℃ 60%RH 環境下にて 1 ヶ月静置)、絶乾燥状態 (水中養生後、65℃乾燥) 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。

なお、モルタルについては、対応する水セメント比のコンクリートの調合から粗骨材を抜いたものとした。

表 1: 使用材料

	材料	密度		比表面積
		[g/cm <sup>3</sup> ]	[g/cm <sup>3</sup> ]	[cm <sup>2</sup> /g]
水	純水	1.00	—	—
混和材	早強ポルトランドセメント	3.14	—	4.52E+03
	シリカフューム	2.22	—	2.00E+05
減泡剤	フライアッシュ	2.24	—	5.35E+03
	ポリカルボン酸エーテル系化合物	1.05~1.09	—	—
減泡剤	ポリアルキレングリコール誘導体	0.98~1.02	—	—
	材料	絶乾燥密度	表乾燥密度	吸水率
		[g/cm <sup>3</sup> ]	[g/cm <sup>3</sup> ]	[%]
細骨材	佐野産砕砂(石灰石砕砂)	2.60	2.63	1.27
	奥多摩産砕砂(硬質砂岩砕砂)	2.67	2.70	1.24
粗骨材	青梅産砕石	2.64	2.66	0.58

表 2: コンクリートの調合の例

W/B	W/C	W	B		S	G	減泡剤	減泡剤	空気量
			C	混和材					
[%]			[kg/m <sup>3</sup> ]		[%]				
18.0	20.0	160.0	888.9	88.9	425.0	1060.2	2.7	0.7	2.0
			800.0	88.9					

(3) 各種物性試験

加熱にともなう試験体の脱水現象と組成変化の関係を確認するため、TG-DTA 及び DSC を用いてコンクリートの温度上昇に伴う質量減少量及び発熱量の関係を求めた。

試料には、加熱実験と同バッチのコンクリートを使用し、前処理として、水和停止するためにアセトン浸漬を 24 時間行い、24 時間真空脱気により乾燥させた後、窒素雰囲気下で粉碎し、粒径が 50 μm 以下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℃/min で行った。

一方、加熱によるセメントペースト、細骨材、粗骨材の変形挙動について考察するため、TMA を用いて各材料の熱膨張係数を求めた。試験体は、5×5×5mm<sup>3</sup> に切断し、65℃で 24 時間乾燥させたものを使用した。なお、細骨材は砕砂のため、同産地の砕石で代用した。測定は窒素雰囲気下にて荷重 100mN、昇温速度 10℃/min で行った。

(4) 加熱試験および NR 測定概要

本研究における NR 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 $100 \mu\text{m/pixel}$ である。なお、爆裂試験においては光学系イメージングインテンシファイアの導入を試み高速度撮影を実施した。

試験時の装置配置図を図-1に示す。また、装置配置は、予備加熱中性子適用実験における複数回の仕様調整を踏まえて、図-2に示すアルミ製治具により固定した。加熱はガスバーナーにより行い、加熱中の位置ずれや側面に回り込んだ火炎からの加熱を防ぐため、試験体側面にアルミ製のブランケットを敷くなどして工夫した。

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。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-3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))加熱曲線を同図に示した。

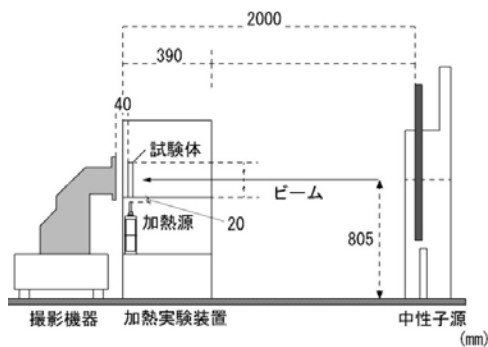


図-1 装置配置図

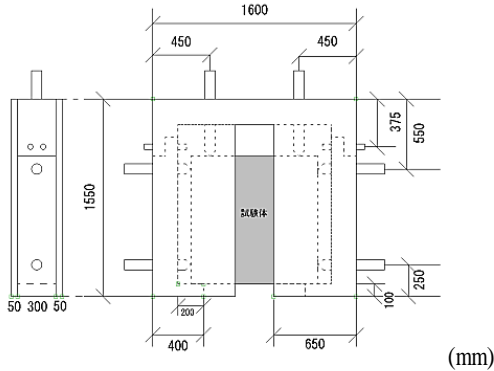


図-2 アルミ製拘束治具

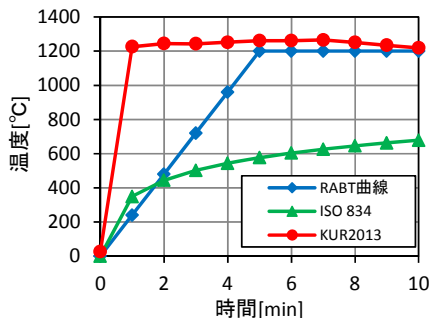


図-3 試験体底面の加熱曲線

加熱試験は、普通強度のコンクリート、高強度コンクリート、超高強度コンクリート、モルタルおよびペーストにより実施し、さらに、骨材種類を複数種対象とした。また、高強度コンクリートの爆裂対策として一般的な有機系繊維の混入の有無についても検討を行った。

#### 4. 研究成果

##### (1) 各種物性試験の結果

各種コンクリート、モルタル、ペーストについて線膨張係数の温度依存性について測定した結果の一例を図-4に示す。また、TG-DTAの測定結果を図-5に、DSCの測定結果の例を図-6に示す。温度上昇にともない、100、500、800°C近傍で吸熱反応とともに急激な質量減少が観測された。これは、各温度において組成変化が発生したためだと考えられる。

これら検討により、調合の異なるセメント硬化体およびコンクリートの構成材料の熱化学的特性および物理的特性について把握した。特に、後述する爆裂領域に想定される温度範囲における質量変化は、主として脱水によるものと考えられ、これら領域の水分の湧き出し挙動について定量化することが出来た。

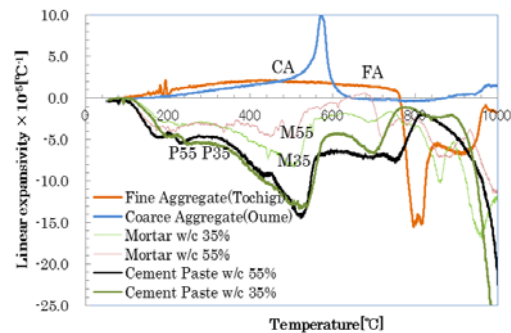


図-4 TMA 測定結果の例

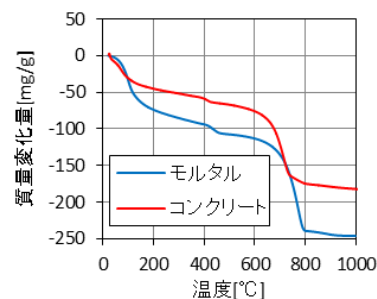


図-5 温度と質量変化の関係の例(TG)

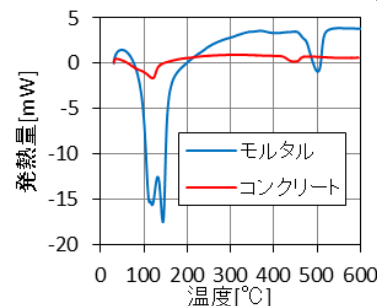


図-6 温度と発熱量の関係の例(DSC)

(2) 中性子適用加熱実験結果

a) 水分定量化に関する予備実験

予備実験において、水分の定量は既往の研究を参考に、中性子透過率と体積含水率の関係を求め、定量精度を確認した(図-1). なお同様の試験をモルタルおよびペーストにおいても実施し、定量性の確保に努めた。

水分量の分析においては、試験体内部のペースト量のばらつきによる試験結果の誤差を減らすため、評価は単位ペースト量あたりの水分量に変換して評価した。

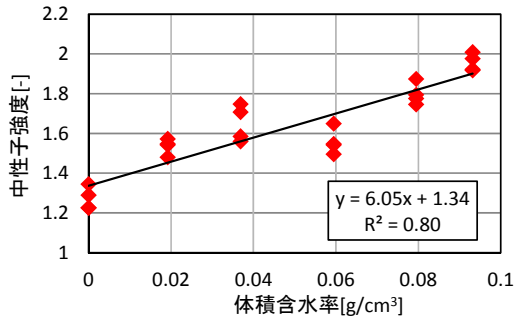


図-7 コンクリートの透過率と体積含水率の関係

b) 中性子適用加熱実験

コンクリートを用いた場合の、中性子適用加熱実験の結果の一例を図-8に示す。試験は、図は、色の白い箇所は、水分量が加熱前より増加したエリアである。

一連の実験から、加熱面から数cmの箇所において、水分が当初量より増加するいわゆる水分ダマリが確認されるとともに、時間とともに加熱面から離れるように上昇して行く

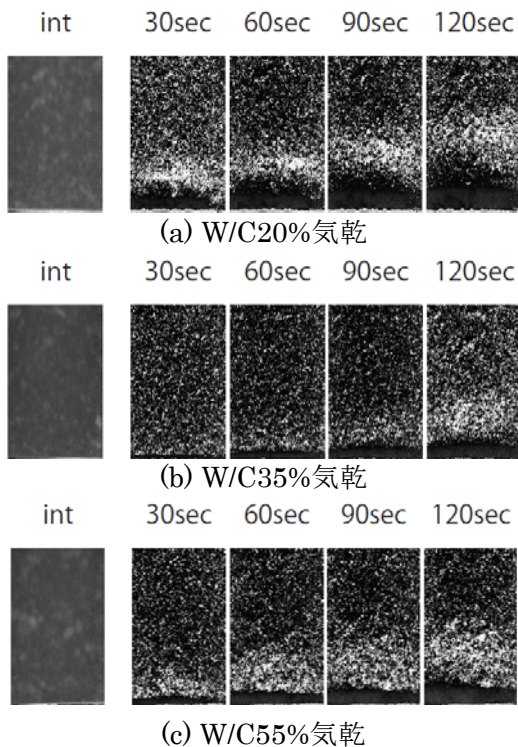


図-8 コンクリートの加熱時における TNRF 測定結果(差分画像)

様子が確認された。これは加熱に伴う水分移動と、水蒸気として移動した水分が低温領域で再凝集した結果生じる為と考えられ、継続的な加熱に伴い、水分が再凝集する低温エリアが上昇して行くためと考えられる。

同様の測定を、コンクリートおよびモルタル、ペーストなどの水準に対して実施し、水分移動に関する基礎データを得ることに成功した(図-9)。

また、一部試験体においては加熱面において爆裂現象を確認し、爆裂発生前後の水分状態の定量に成功した。

爆裂により剥離した部位は、最大で加熱から5mm程度であった。TNRFによる水分定量結果と比較したが、爆裂前後においても中性子で捉えられるレベル(凝縮水)の水分量の変化は観察されなかった。また、剥離した部位の直上の爆裂発生時の温度は、加熱面近傍の急激な温度変化を有する範囲と想定された。温度分布の測定解像能の向上が強く望まれる。

なお、一連の実験から、爆裂発生の有無に与える調合の影響、初期含水率の影響、特に有機系繊維の与える影響について、特に水分挙動の観点からのデータ取得に成功した。

(5) まとめ

本研究では、完全非破壊測定手法である中性子ラジオグラフィによる局所水分挙動の解明を軸として、高温作用下におけるコンクリートの熱水分移動・圧力形成・変形メカニ

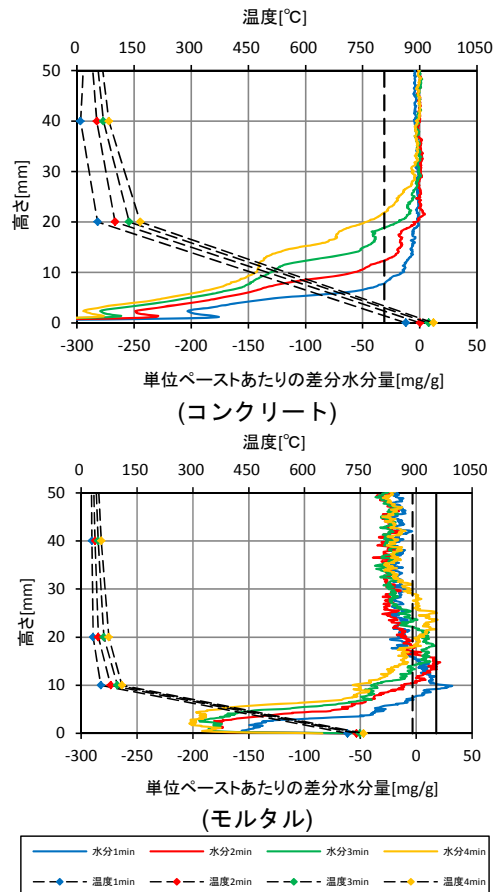


図-9 加熱下における温度と水分分布の例

ズムを解明することを目的とし、一連の実験的研究を実施し、以下を成果として得た。

- a) TNRFによる予備試験により、水分定量化手法の構築を行った。
- b) TNRFにより、コンクリートの爆裂前後における水分状態を捉えることに成功した。
- c) 定量化手法により得た水分分布から、加熱時における水分溜りの形成を確認するとともに、水分溜りの移動現象を捉えることに成功するとともに、水分ダマリの形成のメカニズムは、加熱により移動した水蒸気が低温領域で再凝集した結果であることを明らかにした。
- d) 水分移動モデルの構築を行い、実験結果の検証を行った。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 10 件)

- ① 兼松学、高強度コンクリートの爆裂時における水分挙動に関する研究、セメント・コンクリート研究討論会講演梗概集、査読無、Vol.39、2012
- ② 兼松学、土屋直子、野口貴文、コンクリートの吸水過程における粗骨材の影響に関する研究、コンクリート工学年次大会論文集、査読有、Vol.35、No.1、2013、pp.667-672 兼松学、足永靖信、武田仁、中野昌宏、中性子ラジオグラフィによる等温状態における建材中の水分挙動の観測と数値解析、日本建築学会構造系論文集、査読有、Vol.696、2014.2、pp.201-210
- ③ 中野昌宏、兼松学、田村政道、高温加熱を受ける高強度コンクリートの組成変化を考慮した水分状態の推定、日本建築学会大会学術講演梗概集、査読無、2013、pp.111-112
- ④ M. Kanematsu、M. Nakano、M. Tamura、N. Tuchiya、Y. Saito and Y. Kawabata In-situ Measurement of the Hydraulic Behavior of High Strength Concrete under High Temperature、KURRI Progress Report 2012、査読無、2013、PR4-8
- ⑤ 兼松学、土屋直子、野口貴文、熱中性子ラジオグラフィによるコンクリート中の吸水過程の解明、日本建築学会構造系論文集、査読有、Vol.78、No.690、2013、pp.1339-1347、<http://dx.doi.org/10.3130/aijs.78.1339>
- ⑥ 兼松学、中野昌宏、田村政道、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、日本建築学会大会学術講演梗概集、査読無、2014
- ⑦ 猪瀬亮、兼松学、田村政道、中野昌宏、高温加熱下におけるモルタル中の水分挙動に関する実験的研究、セメント技術大

会講演要旨、査読無、Vol.38、2014、pp.340-341

- ⑧ 兼松学、中野昌宏、田村政道、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、日本コンクリート工学会年次講演集、Vol.36、No.1、2014
- ⑨ 猪瀬亮、兼松学、田村政道、中野昌宏、高温加熱下におけるセメント硬化体中の水分挙動に関する実験的研究、第 51 回アイソトープ・放射線 研究発表会講演要旨集、2014、2p-V-09
- ⑩ 兼松学、コンクリートのイメージング、Isotope News、No.722、2014

[学会発表] (計 8 件)

- ① 兼松学、Advanced Researches on Durability of Reinforced Concrete Structures –Applications of Neutron Measurement in concrete engineering field in JAPAN–、韓国海洋大学 国内外専門家招聘セミナー (招待講演)、2012 年 11 月 21 日、韓国海洋大学 (韓国)
- ② 兼松学、高強度コンクリートの爆裂時における水分挙動に関する研究、セメント・コンクリート研究会、2012 年 11 月 19 日、岩手県公会堂
- ③ 兼松学、高温加熱下における強度コンクリートの可視化、中性子イメージング研究会、2013 年 1 月 9 日、京都大学原子炉実験所
- ④ 猪瀬亮、兼松学、高温加熱下におけるセメント硬化体中の水分挙動に関する実験的研究、第 51 回 アイソトープ・放射線研究発表会、2014 年 7 月 8 日 (火)、東京大学弥生講堂
- ⑤ 兼松学、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、日本コンクリート工学会大会、2014 年 7 月 11 日、サンポート高松
- ⑥ 猪瀬亮、兼松学、高温加熱下におけるモルタル中の水分挙動に関する実験的研究、セメント技術大会、2014 年 5 月 15 日、ホテルメトロポリタン
- ⑦ 兼松学、コンクリートの吸水過程における粗骨材の影響に関する研究、日本コンクリート工学会、2013 年 7 月 11 日、名古屋国際会議場
- ⑧ 中野昌宏、兼松学、高温加熱を受ける高強度コンクリートの組成変化を考慮した水分状態の推定、日本建築学会大会学、2013 年 8 月 31 日、北海道大学

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

<http://www.rs.noda.tus.ac.jp/manabu/nr/nr.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

兼松 学 (KANEMTASU MANABU)

東京理科大学・理工学部・准教授

研究者番号：00312976

### (2) 研究分担者

該当なし

### (3) 連携研究者

該当なし