

論文 極高温加熱を受けたコンクリートの細孔構造とクリープ特性

依田 祐果^{*1}・今本 啓一^{*2}・清原 千鶴^{*3}

要旨：高温加熱を受けたコンクリートの強度特性に関する研究は比較的多いが、吸水特性やクリープ特性に関する研究は皆無といってよい。本研究は、高温加熱を受けたフライアッシュコンクリートの吸水特性、圧縮特性および圧縮クリープ特性について検討するとともに、その細孔構造について調査した。その結果、750℃までの加熱において、圧縮強度は90%程度低下し、300℃の加熱において、クリープひずみは約2.5倍増加し、細孔量が増大することを示した。

キーワード：高温加熱、フライアッシュコンクリート、圧縮強度、クリープ、細孔構造

1. はじめに

ガス爆発やテロなどにより損傷した構造物は撤去されるのが一般的である。しかし、福島原子力発電所における事故のように、爆発や極高温加熱を受けた後も存在し続けなければならないことに加え、撤去が始まるまでに30年はかかると推測されており、その間この構造物は自立せざるを得ない¹⁾。また、その他の構造物に関しても、火災など高温加熱を受けた後も供用される事例も多く、爆発や火災といった加熱による構造物への影響は重要であり、健全な構造物と比較すると性能低下が懸念されることは明らかである。

しかしながら、爆発や極高温加熱といった熱的作用を受けたコンクリートに関する研究として、圧縮強度などの力学的特性への影響に関する研究がほとんどであり、時間の経過に伴う構造物の耐久性の低下に関する研究は皆無である。

そこで本研究は、高温加熱を受けたコンクリートの長期的な変形性能を評価することを最終目的としている。本論文はそのための基礎的な検討として吸水特性やクリープなどの耐久性に関わる基礎的な性状を明らかにすることを目的としている。福島第一原子力発電所を一例とし、原子力発電所で汎用的に用いられているフライアッシュを混和したコンクリート試験体を対象として、高温加熱を受けたコンクリートの吸水特性、圧縮強度特性およびクリープ特性ならびに細孔構造について実験的に検討を行った²⁾。

2. 解析概要

2.1 解析プログラム

本研究において、マスコンクリートの非線形温度応力解析プログラムの一つである「ASTEAMACS(Ver.5)」

を用いて温度履歴解析を行った。本ソフトは、有限要素法による温度応力解析プログラムであるが、本研究において想定する2000℃以上の極高温物質はモデルの対象外であり、高温物質による水分蒸発やコンクリートの溶融現象は考慮することができないため、本研究における温度解析は、実験における加熱温度の目安を得るための概略的なものとして位置づけられる。なお、今後詳細な解析結果が公表された際には、以下に示す解析結果との照合を行いたい。

2.2 解析プラン

本研究における解析対象は、図-1に示すRC部材が熱源により受ける熱履歴を解析した。本研究で用いた解析プランを図-1に示す。解析に用いた物性条件を表-1に示す。

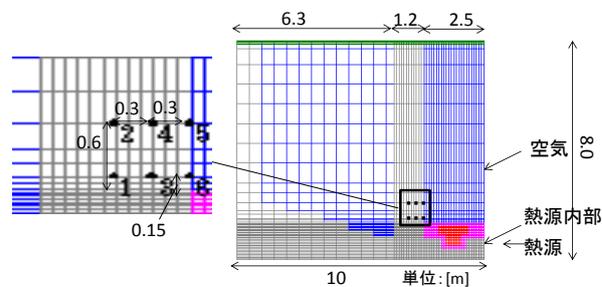


図-1 解析プラン

表-1 物性条件

	熱伝導率 [W/m ² °C]	密度 [kg/m ³]	比熱 [kJ/kg°°C]	初期温度 [°C]
空気	0.0257	1.166	1.006	20
コンクリート	1.65	2280	0.92	20
熱源	51.3	7850	0.47	2700
スチール	51.3	7850	0.47	20

2.3 解析条件

図-2における熱源の表面温度は初期温度を2700℃と

*1 東京理科大学大学院 工学研究科建築学専攻 (学生会員)
 *2 東京理科大学 工学部 建築学科准教授 工博(正会員)
 *3 東京理科大学 工学部 建築学科嘱託補手 工博(正会員)

し、(公社)JCIによって公表されている建屋内温度測定の結果(復旧時(事故後 300 時間後、約 396°C)を直線で補間し結び、熱源の温度変化とした³⁾。境界条件は、全方面断熱とし、熱源の内部温度を別途図-2のように2種類設定した⁴⁾。解析期間は、12日間である。

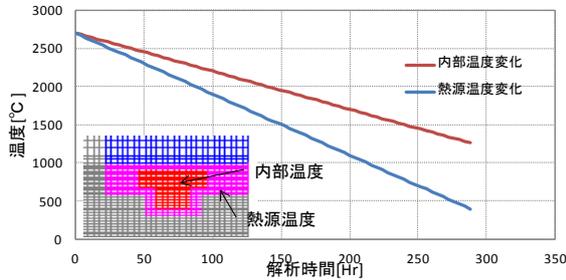


図-2 熱源の温度

2.4 解析結果

解析結果を図-3に示す。ここでは一例として、東日本大震災に報告される発電所施設の規模の部材を対象として温度解析を行った。RC部材における、熱源により近い部分、柱中央部分およびその中間点を対象とした。まずこの解析は、試験温度を決定するための概略的なものであるが、結果によると、解析結果6は、解析した時間間隔に応じて不連続となっている。これは、上記にも述べた通り使用した解析プログラムにおいて、2000°C以上の高温物質はモデル対象外であるために不連続となったと考えられる。しかしこの結果において、熱源に触れないが熱源に近い部分では700°C以上の温度が2日程度続いている。柱中央部分においても、300°C以上の値が7日ほど続いており、熱源より約1m上に離れた地点では、伝熱に5日ほど要しそれ以降は200°C程度が保たれている。そのため、本研究では試験体への加熱時間を300°Cで7日間、750°Cで3日間とし実験を行うことにした。

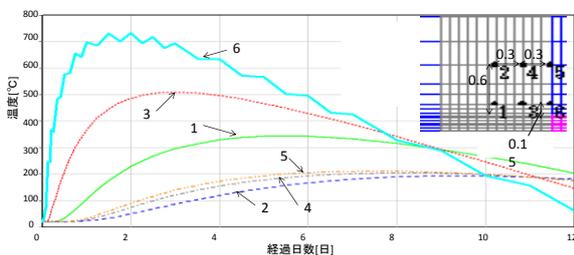


図-3 解析結果

表-2 試験体調査および試験体材料

W/B(%)	単位量 [kg/m ³]					Ad C × %
	W	C	FA	S	G	
60	180	240	60	850	950	1.5
使用材料	水(W): 上水道水					
	セメント(C): 普通ポルトランドセメント(密度=3.16g/cm ³)					
	細骨材(S): 枚方産山砂(表乾密度=2.68g/cm ³)					
	粗骨材(G): 高槻産砂質砂岩砕石(表乾密度=2.68g/cm ³)					
	混和材: AE減水剤(リグニンスルホン酸系)					
	フライアッシュ(FA): 表乾密度=2.25g/cm ³					

3. 実験概要

3.1 試験体概要

表-2に本研究で用いたフライアッシュコンクリート試験体(300×300×100mm)の調査および使用材料一覧を示す。フライアッシュコンクリートは、原子力発電所で汎用的に使用されていることから選定した。なお、試験時におけるコンクリートの材齢は5年である。この研究では、継続利用された構造物を想定しているため材齢が経過し、セメントの水和反応やフライアッシュのポズラン反応の影響が少ない物を用いた。コンクリート平板からφ50×100mmのコンクリートコアを13本採取し、後述の試験に供した。

表-3 実験一覧

実験項目	加熱温度		試験体本数	
吸水率	20°C			2
	300°C			
	750°C			
圧縮強度(ヤング係数)			1	
圧縮クリープ	クリープ	20°C		20-D
		300°C		真中 300-D 24時間吸水 300-W
自由収縮	自由収縮	20°C	20-D	
		300°C	24時間吸水 300-W	

3.2 試験項目と方法

本研究で行った実験一覧を表-3に示す。

(1) 加熱方法

供試体の加熱は、プログラム温度調節器付きの電気炉(炉内寸法 W120×D190×H90mm、底面加熱方式)の試験機で行った。前述解析の結果より、加熱は目標温度到達後、300°Cで7日間、750°Cで3日間とした。供試体は加熱前に105°Cに設定した乾燥炉内で48時間乾燥させ絶乾状態とした後、アンシール状態で縦向きに試験体を配置し加熱した。加熱終了後は供試体温度が外気温度と同温度になるまで炉内で自然冷却し、試験を行った。なお、目標温度に対する制御温度は、目標温度+20°Cとした。

(2) 吸水試験

常温供試体は、105°Cに設定した乾燥炉内で48時間乾燥させ絶乾状態とした後、24時間吸水させ、その前後の質量より吸水率を求めた。

加熱後の供試体は、外気温度と同程度になった後、24時間吸水させ、その前後の質量より求めた。

(3) 圧縮強度試験

圧縮強度試験は、JIS A 1108に準じて実施した。圧縮強度試験により、最大荷重およびひずみを測定し、測定結果から応力-ひずみ曲線を求め、ヤング係数(圧縮強度の1/3 応力時割線係数)を算出した。供試体のひずみは、ひずみゲージにより測定した。なお、ひずみゲージの貼り付けは可能な限りひび割れが発生していない箇所に行っている。

(4) 圧縮クリープ試験

圧縮クリープ試験は、JIS A 1157に準じて実施した。

ひずみの測定には、コンクリートからの水分による絶縁低下を防ぐためステンレスベースのメタルゲージを使用した。載荷荷重は 300℃加熱供試体の圧縮強度の 1/3 程度である、0.9kN とした。

本研究では、発電所の事故後冷却のために給水されたことをふまえ、加熱された試験体の含水状態を変化させた⁵⁾。300℃に加熱された試験体 5 本に対し、2 本は気中養生(300-D)し、残りの 3 本は 24 時間吸水させた後、気中に放置し表乾状態(300-W)となったところで試験を行った。なお、3 本のうち 1 本は自由収縮用の試験体とした。常温の試験体は吸水させず、そのまま載荷を行った。また、実験はすべて恒温恒湿室内(20±2℃、湿度 60±5%RH)で行った。

(4) 細孔構造

本研究では、圧縮試験後の供試体(常温, 300℃, 750℃)をそれぞれ粉砕し、5mm のふるいを通過し、2.5mm のふるいにとどまるもののうち骨材を除いたものを測定対象とした。調整した試料を 1 日間アセトンに浸漬後、40℃にて 24 時間乾燥後、20℃の真空乾燥機で 1 日間乾燥させ、測定した。測定方法は、水銀圧入式ポロシメータを用い、細孔直径約 3nm～約 425 μm に相当する 0.0034～414MPa の圧力範囲で測定を行った。

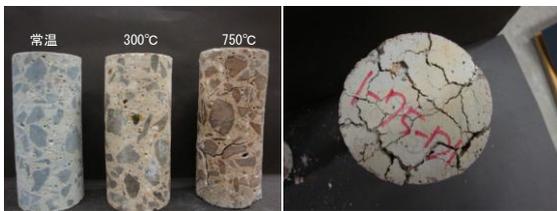


写真-1 加熱後試験体 写真-2 750℃試験体

4. 実験結果および考察

4.1 目視観察

写真-1 に常温および加熱後の供試体外観を示す。写真-2 に加熱後の 750℃の試験体の上部を示す。

まず供試体の色について、加熱温度が 300℃以上 600℃程度の場合、供試体はピンク色となり、600℃以上 900℃以下程度の加熱温度であると灰白色と変化することが知

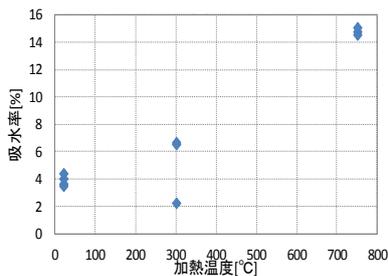


図-4 吸水試験

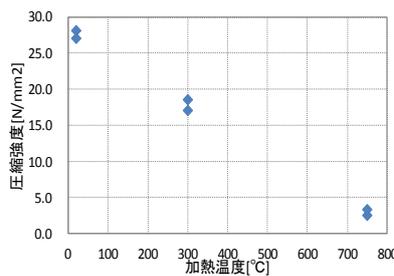


図-5 圧縮強度試験

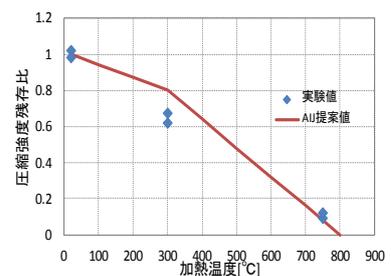


図-6 圧縮強度残存比

られている⁶⁾。本研究において、300℃および 750℃の供試体はピンク色の状態を保っていた。

また、一般的にコンクリート表面の受熱温度が 580℃以上になると亀甲状の亀裂が生じることが知られている。本研究においては、300℃に加熱した供試体では亀裂は生じていないが、750℃に加熱した供試体には亀甲状の亀裂が生じていることがわかる。また、750℃の供試体に関して、加熱終了後より時間が経つほどひび割れ幅が大きくなり、また、供試体に触るだけで破片が落ちるほど脆弱になっていた。

4.2 吸水特性

図-4 に加熱後の吸水率と加熱温度の関係を示す。本実験結果は、加熱温度の上昇により吸水率も上昇していることを示している。300℃、750℃の試験体では、常温の試験体と比較するとそれぞれ 300℃の試験体では最大で約 2 倍、平均すると 1.7 倍増加した。700℃の試験体においては最大 4.3 倍、平均すると 3.8 倍程度増加した。このことはすなわち加熱によりクラックが発生し、高温加熱を受けたコンクリートでは、鉄筋の腐食要因となる水などの物質が容易に浸透しやすい状況にあることを意味している⁷⁾。

4.4 圧縮試験

図-5 に圧縮強度と加熱温度の関係、図-6 に圧縮強度残存比と加熱温度の関係(常温供試体の圧縮強度に対する各加熱温度における圧縮強度の比として算出)を AIJ 提案値と共に示す。この提案値とは、日本建築学会「構造材料の耐火性ガイド 2009」⁸⁾に示されるものである(以下、AIJ 提案と称する)。なお、750℃の試験体に関しては圧縮試験時にも表面のひび割れは発生していたが、試験は実施可能であった。ひずみの測定値は取得できたが、ほぼゼロ値とみなすことが出来る。本実験においても、加熱温度が高くなるにつれて圧縮強度は低下している。750℃加熱後の圧縮強度は、加熱前の 10%程度まで低下した。AIJ 提案値と比較すると、本実験結果は 300℃、750℃ともに低い値を示している。既往の研究⁹⁾において、セメントの種類は高温時の圧縮強度に大きく影響しないとされていることも踏まえると、本研究の実験結果と AIJ の提案値は同様の傾向であるといえる。

4.3 応力ひずみ曲線

図-7 に圧縮強度試験から得られた応力-ひずみ曲線を示す。図-8 に実験で得られた最大応力時の各温度ひずみのデータと AIJ 提案値を併せて示す。図-8 における AIJ 提案値は、圧縮強度時ひずみの増加比を常温試験体の最大応力時のひずみを基に算定した数値である。

図-7 において加熱温度が高くなるにつれて、応力度に対するひずみは大きく、勾配が緩やかになっており、既往の研究とほぼ同様の結果が得られている。しかし、750°C加熱の供試体において応力度に対するひずみがあまり伸長せず、ひずみが大きくなる前に最大強度をむかえ、圧縮試験が終了している。そのため、図-8 においても常温、300°Cの試験体は AIJ 提案値の倍率とほぼ同様の傾向を呈しているが、750°C供試体は提案値から大きく外れている。750°C供試体には圧縮試験開始前から亀甲状にひび割れがあったことから荷重前よりひずみが進行していたことが原因として挙げられる。

4.5 ヤング係数

図-9 にヤング係数と加熱温度、図-10 に圧縮試験結果と同様にヤング係数残存比と加熱温度の関係を示す。ヤング係数は、温度の上昇とともに低下している。また、300°C~750°Cよりも常温~300°Cにおける変化のほうがより急激な低下を示しており、750°Cでは常温値の5%程度となっている。AIJ 値と比較すると、常温~300°Cにかけてほぼ同様の傾向を示している。このことは、熱的損傷を受けることにより RC 部材の変形がより大きくなる可能性のあることを示していると考えられる。

4.6 圧縮クリープ試験

本研究において、当初 750°C、300°Cおよび常温の3種の試験体で測定を行う予定であったが、750°Cの試験体の

損傷が激しく荷重不能と判断した(写真-2)。そのため、加熱温度 300°Cおよび常温の試験体に圧縮クリープ試験を行った。常温および加熱温度 300°Cの試験体に対して行った圧縮クリープ試験による自由収縮ひずみ、スペシフィッククリープひずみの結果をそれぞれ図-11、図-12に示す。

図-11 における自由収縮ひずみ測定結果では、常温試験体では、既に材齢5年が経過しているため、収縮ひずみはほとんど進展していない。一方、300-Wは収縮ひずみが材齢約80日で、 250×10^{-6} 程度収縮が進行している。スペシフィッククリープひずみは、全ひずみから荷重時弾ひずみと自由収縮ひずみを引いて求めたクリープひずみを荷重時応力で除して求めた。加熱を受けた試験体と受けていない常温の試験体では、クリープ挙動の違いが明らかに異なり、300°Cの加熱を受けた試験体は比較用の常温試験体に比べ、スペシフィッククリープひずみが1.5~2.5倍程度大きくなっている。これは、加熱によって内部にクラックが発生したことにより、試験体内部が脆弱でひずみやすくなったことが原因と考えられる。従ってここで示すクリープは、クリープひずみに加えクラックの変形も含まれると思われるが、この点の分離・評価については今後検討を進めてゆきたい。

次に加熱温度 300°Cの試験体における含水状態の影響について、図-12によると、300-Wは300-Dに比べて荷重初期のスペシフィッククリープひずみが小さく、緩やかにひずみが大きくなっている。また、荷重約12日目には2種類の試験体のクリープひずみは同程度になっており、荷重20日目にはその関係性が逆転している。加熱を受けた後に吸水させた試験体は、内部含水状態の変化によって、ゆるやかにひずみが増加し続けることが分かる。

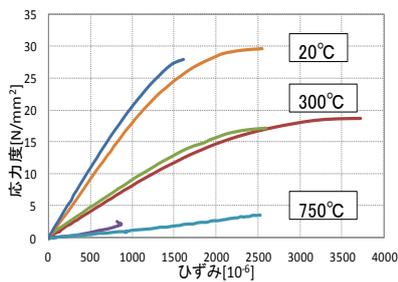


図-7 応力ひずみ曲線

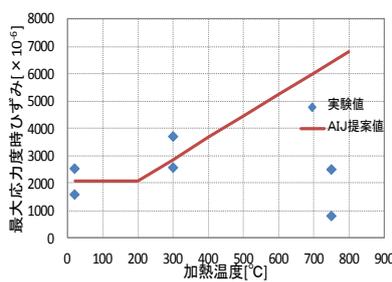


図-8 最大応力度ひずみ

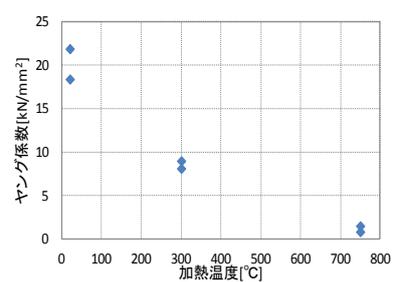


図-9 ヤング係数

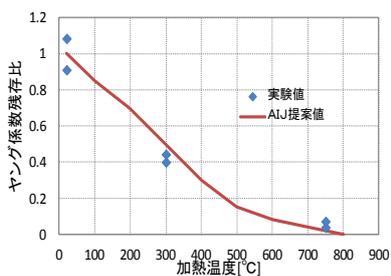


図-10 ヤング係数残存比

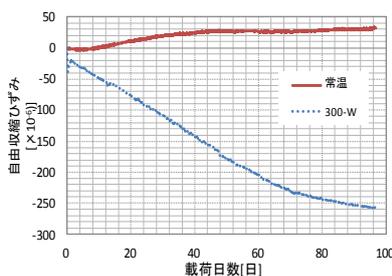


図-11 自由収縮ひずみ

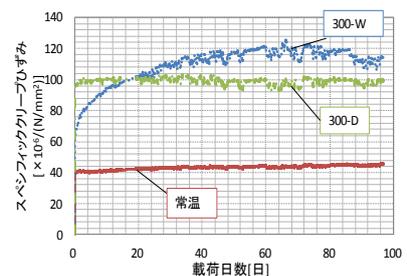


図-12 スペシフィッククリープひずみ

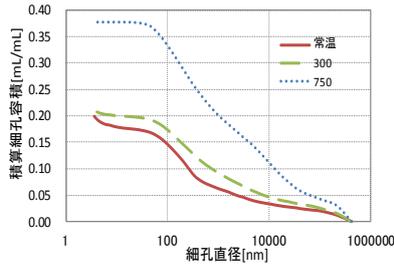


図-13 積算細孔容積

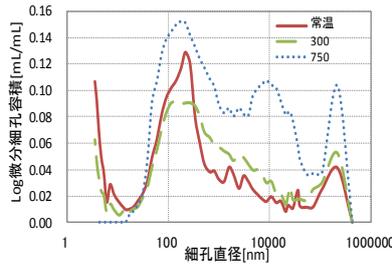


図-14 Log 微分細孔容積

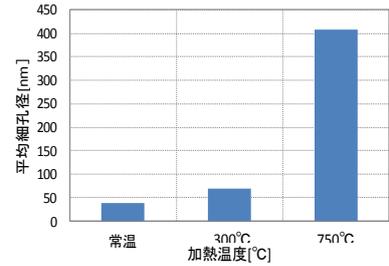


図-15 平均細孔径

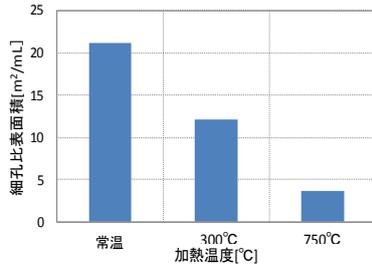


図-16 細孔比表面積

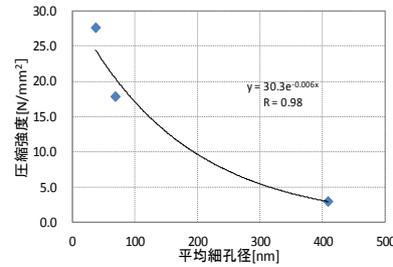


図-17 圧縮強度と平均細孔径

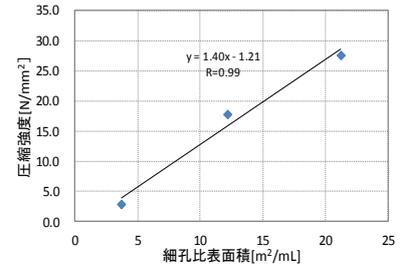


図-18 圧縮強度と細孔比表面積

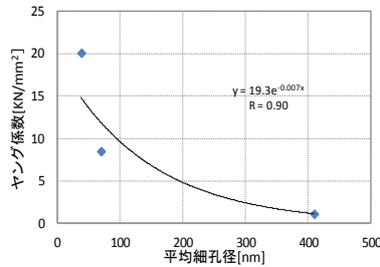


図-19 ヤング係数と平均細孔径

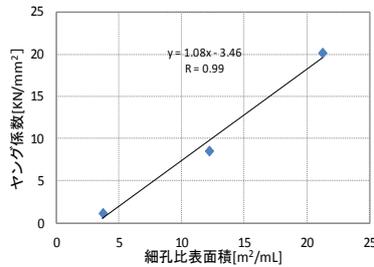


図-20 ヤング係数と細孔比表面積

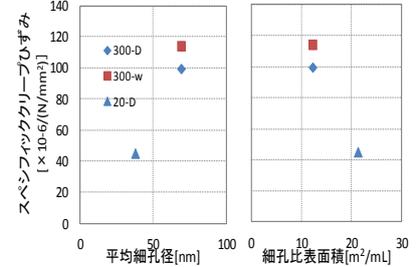


図-21 クリープひずみと細孔径分布

この原因は明らかではないが、含水状態が熱的損傷を受けたコンクリートのクリープの進行に影響を及ぼしていることが示唆された。

4.7 細孔構造

図-13 に水銀圧入法によって得られた細孔直径と積算細孔容積、図-14 に Log 微分細孔容積との関係を示す。図-15 に平均細孔径、図-16 に細孔比表面積を、それぞれの試験体結果を比較した図を示す。

図-13 によると、加熱した試験体は常温の試験体と比較して、細孔容積が増加していることがわかる。積算細孔容積は、ピーク点において、約 300°C の加熱により約 1.2 倍、750°C の加熱により約 2.3 倍増大している。また、図-14 によると、どの試験体においても細孔容積のピークは 100nm 付近にあるが 750°C に加熱した試験体は、細孔直径が全体的に大きく、かつ細孔量が増加している。

一方、300°C は常温と比較すると細孔直径が小さい部分でのピークが低下し相対的に細孔径の大きい領域の容積が増加している。すなわち、既往の研究と同様に、高温加熱を受けることによって、セメントペーストおよび骨材界面に形成される水和物中の結合水の脱水による体積変化や、水和物の消失に伴って生じる微細ひび割れの増加などにより、コンクリートは細孔容積が径の大きい

細孔にシフトする形で増加し、ポーラスな組織になると推定される^{10, 11)}。クリープ挙動にはこのような細孔構造の変化が影響したものと考えられ、この点については、コンクリートの基礎情報として蓄積されるべきであり、今後も検討したい。

また、加熱温度が高くなるほど細孔分布が粗になることは、図-15、図-16 から明らかであり、顕著な結果としては 750°C 試験体の平均細孔径は常温試験体の約 11 倍となっている。また、試料中の単位体積あたりの細孔壁の面積の大きさを示す比表面積は、加熱温度が高くなるにつれ小さくなっている。これらの結果は、セメント硬化体中の自由水及び水和物の結合水の脱水による微細組織の生成及び成長¹²⁾により、組織が粗になっていることと考えられる。

5. 力学的特性と細孔構造

水銀圧入法によって得られた加熱を受けた試験体の平均細孔径および細孔比表面積と、圧縮強度、ヤング係数、スペシフィッククリープひずみの関係について図-17 から図-21 に示す。図-17 に圧縮強度と平均細孔径、図-18 に圧縮強度と細孔比表面積、図-19 にヤング係数と平均細孔径、図-20 にヤング係数と細孔比表面積、図-21 にクリープひずみと平均細孔径および細孔比表面積、

の関係を示す。

図-17によると、平均細孔径が増大することで圧縮強度は低下しており、反比例の関係にあることがわかる。一方、図-18では、細孔比表面積が大きくなることで圧縮強度は低下しており、直線的に比例している。この傾向はヤング係数との関係を示している図-19 および図-20でも同様である。これらの結果は、加熱を受けたことで細孔径が粗大化したことが、圧縮強度およびヤング係数に、影響を及ぼしていることが定量的に示されている。

図-21では、載荷材齢97日における各スペシフィッククリープひずみと平均細孔径および細孔比表面積の関係性を示している。常温試験体と300℃に加熱した試験体における平均細孔径とスペシフィッククリープひずみを比較すると、加熱をした試験体は常温の試験体に比べ平均細孔径が増大することでスペシフィッククリープひずみは約2.2倍増加する。細孔比表面積は小さくなることで、同様にクリープひずみが増大することが示された。

また、今回は限られた調査のコンクリートについて限定された加熱条件での検討が行われており、今後はさらに多くのケースについて細孔特性とクリープ挙動の関係を検討してゆきたい。

6. 結論

高温加熱を行った水セメント比60%、粗骨材種類として砂質砂岩碎石を用いた材齢5年のフライアッシュを混和したコンクリートに対し各種の実験を行った結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 加熱したフライアッシュコンクリートは加熱していない試験体に比べ、強度低下を起こし、その残存比などは既往の研究やAIIによる提案値により評価できる。
- (2) 加熱によって試験体内部にクラックが生じ、加熱していない試験体に比べクリープひずみが大きくなる。また、試験体の含水状態はクリープ挙動に影響を及ぼしており、水分の含有によりクリープは持続的に進展する挙動が認められた。
- (3) 極高温加熱によって細孔径分布は細孔容積が径の大きい細孔にシフトする形で増加すると考えられる。

試験結果は以下にまとめられる。

加熱温度	圧縮強度	ヤング係数	クリープ
300℃	35%低下	58%低下	250%増加
750℃	89%低下	94%低下	試験不可

*常温試験体に対して

なお、高温加熱による劣化性状は骨材種類によっても異なることが考えられるため、引き続きデータの蓄積を行う予定

である。また、本論文で得られた実験データを用い、劣化状況の異なるコンクリート部材の変形性能について解析的に検討を行うと同時に、高温加熱や爆轟を受けたコンクリート試験体の損傷評価方法についても検討を行う予定である。また、熱的損傷を受けたコンクリートに及ぼす海水および淡水中に及ぼす影響も検討していきたい。

謝辞

本研究を行うにあたり、(一財)日本建築総合試験所下澤和幸博士に試験体の提供をして頂いた。ここに感謝の意を示す。

参考文献

- 1) 東京電力株式会社：福島第一原子力発電所1～4号機の廃止措置等に向けた中長期ロードマップ，東京電力株式会社，2013.6
- 2) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5N 原子力発電所施設における鉄筋コンクリート工事，pp.145-153，2013.2
- 3) 東京電力株式会社：福島第一原子力発電所1～3号機の炉心損傷状況の推定について，2011.11
- 4) 青柳征夫訳：チェルノブイリ原子力発電所事故—コンクリート構造物に及ぼした影響—，技報堂出版株式会社，pp.8-22，2013.5
- 5) 日本コンクリート工学会：東日本大震災に関する特別委員会報告書，日本コンクリート工学会東日本大震災に関する特別委員会，pp.524-572，2013.3
- 6) 日本建築学会：建物の火害診断および補修・補強方法指針(案)・同解説，日本建築学会，pp.31-34，2010.2
- 7) 小澤満津雄，向井佑真他：火害を受けた高強度コンクリートの物質侵入抵抗性，コンクリート構造物の補修・補強・アップグレード報告集 第13巻，pp.495-500，2013.11
- 8) 日本建築学会：構造材料の耐火性ガイドブック，日本建築学会，2004.11
- 9) U.シュナイダー：コンクリートの熱的性質，技報堂，1983.12
- 10) 田村雅紀，嵩英雄，彦坂信之他：高温にさらされたコンクリートの劣化におよぼすセメント・骨材と暴露条件の影響(その5)高温暴露後の細孔量および細孔径分布の変化，日本建築学会大会学術講演梗概集，2012.9
- 11) X.Luo,W.Sun,Y.N.Chan: Residual compressive strength and microstructure of high performance concrete after exposure to high temperature, Materials and Structures Vol.33, pp.294-298, 2000.6
- 12) 仁木孟伯，原田克己：加熱を受けた高強度コンクリートの強度性状，セ技年報，1983