

論文 高温加熱を受けたコンクリートの圧縮強度と弾性係数との関係

緑川 猛彦^{*1}・車田 研一^{*2}・江本 久雄^{*3}

要旨：高温加熱を受けたり高温加熱後に水中養生を施したコンクリートの圧縮強度と弾性係数との関係を明らかにするために、100℃から1,000℃まで加熱したコンクリートについて圧縮強度、静弾性係数、動弾性係数を測定した。その結果、700℃程度まで高温加熱した後に水中養生を施したコンクリートの圧縮強度は、加熱前コンクリートの圧縮強度の70%程度まで回復するものの、弾性係数は圧縮強度に見合うほどの回復は見られず、健全なコンクリートから求められた圧縮強度-静弾性係数の関係式から大幅に逸脱すること、従って、高温加熱されたコンクリートの損傷程度は圧縮強度のみでは評価できないことなどが明らかになった。

キーワード：コンクリート、高温加熱、圧縮強度、静弾性係数、動弾性係数

1. はじめに

福島第一原子力発電所では、東日本大震災によって生じた津波の影響で原子力発電所電源が喪失し、原子炉燃料が溶融した。溶融した原子炉燃料は压力容器を通過し格納容器の下部領域、さらには建屋下部領域に到達している可能性がある。この原子炉燃料が到達したと想定される領域はコンクリートを主とする建設材料で構成されているが、今後進められる廃炉作業において作業の安全性を確保するためには、コンクリートの健全性評価が必要である。

例えば構造物の火害調査とその診断においては、構造物の現状と発生した火災の温度や継続時間を把握した上で、構造物の火災による損傷の程度を目視あるいは諸試験により確認して行われる。コンクリート構造物の火害調査においても、目視による周囲の現況調査とコンクリートコア採取による強度試験結果をもとに診断が実施されていることが多い¹⁾。

福島第一原子力発電所においては放射線量の大きさから容易に目視検査や通常サイズのコンクリートコア採取が困難な状況であるが、今後の作業の進展によっては微小なコンクリート片の採取が期待される。

本研究では、その微小なコンクリート片から部材の健全性を把握する手段として弾性係数に着目した。高温加熱したコンクリートおよび高温加熱後に水中養生を施したコンクリートについて弾性係数の挙動を実験的に検討

し、加熱により劣化したコンクリートの基礎的資料を得ることを目的とした。

2. 実験概要

2.1 実験条件

実験条件は、加熱温度20ケース、再養生の有無2ケースをパラメーターとし、それぞれの供試体について動弾性係数、静弾性係数、圧縮強度を測定した。

2.2 使用材料

使用材料は、普通ポルトランドセメント、細骨材としていわき市大久町産山砂、粗骨材としていわき市四倉町産碎石を使用した。骨材の品質を表-1に示す。混和剤は、変性リグニンスルホン酸化合物を主成分とするAE減水剤(記号SP)および変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤を主成分とするAE剤(記号AE)を使用した。

コンクリートの配合は、水セメント比W/C=59.5%(設計基準強度24N/mm²)とし、目標スランプ値は12cm、目標空気量は4.5±0.5%とした。配合表を表-2に示す。

供試体形状は直径100mm高さ200mmの円柱形とし、打設後約2ヶ月間20℃の水中養生を行った。実験に供した試験体はそれぞれの加熱温度で6本とした。

2.3 供試体の加熱と再養生

養生後の供試体を100℃の乾燥炉で24時間乾燥(予備乾燥)した後、プログラム調整器付き電気炉によって供試体を本格加熱した。加熱温度は100℃から1,000℃まで

表-1 骨材の物性

記号	骨材の種類	表乾密度 (g/cm ³)	粗粒率	吸水率 (%)
S	いわき市大久町産山砂	2.58	2.70	1.53
G	いわき市四倉町産碎石	2.70	6.77	0.55

表-2 コンクリートの配合

W/C (%)	単位量 (kg/m ³)					
	W	C	S	G	AE	SP
59.5	171	288	865	964	2.02	2.88

*1 福島工業高等専門学校 都市システム工学科 教授 博士(工学) (正会員)

*2 福島工業高等専門学校 化学・バイオ工学科 教授 博士(工学)

*3 福島工業高等専門学校 都市システム工学科 特命准教授 博士(工学) (正会員)

50℃ピッチ（全 20 ケース）で行った。加熱パターンを図-1 に示す。昇温速度は 1.0℃/分とし、計画加熱温度到達後は供試体内部温度が均一となるよう 24 時間温度を保持した。降温速度は 0.5℃/分とし、ほぼ外気温（20℃）となるまで炉内に放置した。昇温および降温速度は、供試体内外の温度差を小さくし熱応力の影響をできるだけ小さくするように設定したものである²⁾。

所定の加熱を行った後、半数の供試体（3 本）については動弾性係数試験、静弾性係数試験および圧縮強度試験を実施したが、残りの半数の供試体（3 本）については、再度 20℃の恒温水槽に浸し 28 日間の水中養生を行った後に 100℃で炉乾燥を行い各種試験を実施した。

動弾性係数は JIS A 1127 「共鳴振動によるコンクリートの動弾性係数、動せん断弾性係数及びポアソン比試験方法」に準拠し、静弾性係数は JIS A 1149 「コンクリートの静弾性係数試験方法」に準拠し、さらに圧縮強度は

JIS A 1108 「コンクリートの圧縮試験方法」に準拠して測定した。

3. 実験結果及び考察

3.1 加熱温度と圧縮強度

図-2 に加熱温度と圧縮強度との関係を示す。加熱直後に圧縮試験を行ったコンクリート（No Curing）については、150℃付近で一時的に圧縮強度が増加（乾燥による強度増加）するものの、加熱温度の上昇に伴いほぼ比例的に圧縮強度は低下し、850℃以上で圧縮強度はほぼ零となった。その間、600℃において強度低下が観察された。モルタルの実験においても、加熱温度 500℃から 750℃の間で圧縮強度の低下が認められており、これはセメントペースト内部におけるメソ孔内の水蒸気圧の上昇が細孔壁を破壊したことが原因であると考えられた³⁾。よって本実験における強度低下も同様の原因であると推察される。

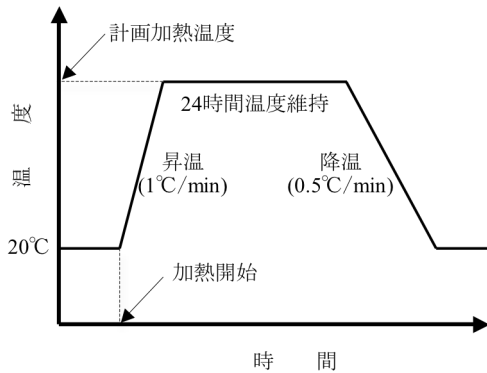


図-1 加熱プログラム

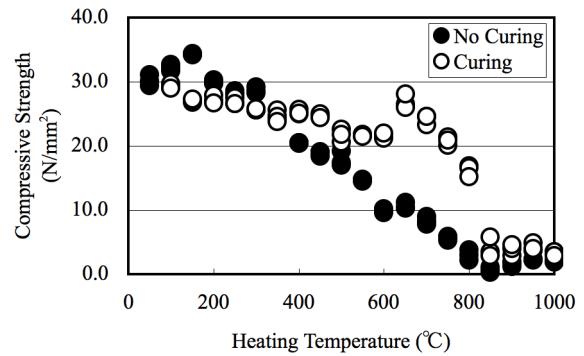
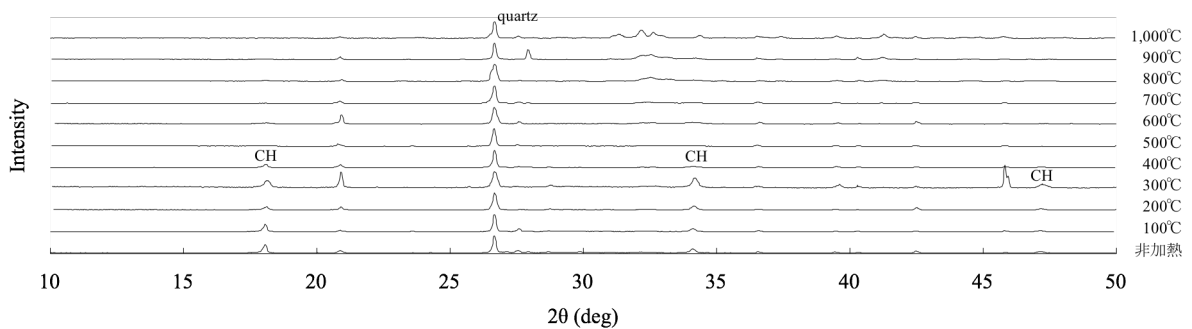
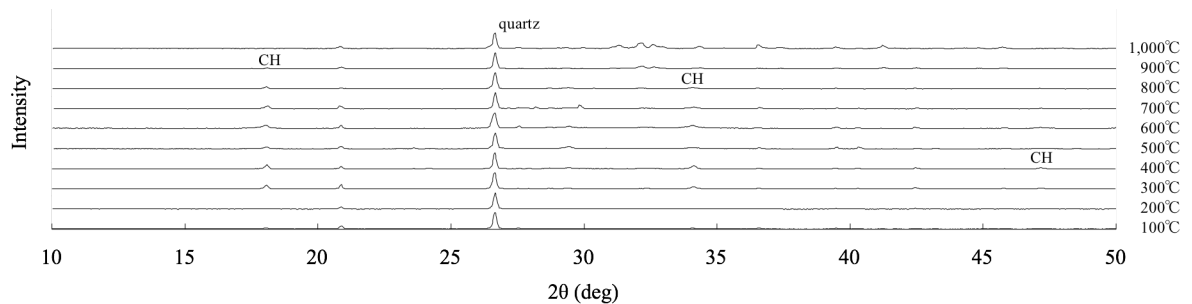


図-2 加熱温度と圧縮強度



(a) No Curing



(b) Curing

図-3 セメントペースト部の X 線回折図

一方、再養生有り (Curing) のケースでは、加熱温度 400°C 以降の全ての加熱温度において、再養生無しの圧縮強度を上回っており、加熱後に水中養生することによりコンクリートの圧縮強度が回復することを表している。一瀬らの研究⁴⁾によれば、高温加熱後の圧縮強度は加熱温度が 500°C 以下であれば水中養生により 80% まで回復することが示されているが、本実験では 800°C 以下において 60% まで回復できる傾向を示した。加えて本実験では 650°C 付近の強度回復が著しいのも特徴であった。これは $\text{Ca}(\text{OH})_2$ や CaCO_3 の熱分解で生じた CaO の再水和に起因するものと思われる⁵⁾。しかしながら、850°C 以降ではゲーレンナイトの生成により再水和反応が阻害されることから、圧縮強度の回復は困難であった⁶⁾。

図-3 にセメントペースト部の X 線回折図を示す。回折角 $2\theta = 18^\circ, 34^\circ, 47^\circ$ 付近が $\text{Ca}(\text{OH})_2$ を表しているが、図-3 (a) で加熱温度 400°C まで存在していたピークがそれ以上の加熱温度で消失している様子が分かる。図-3 (b) は再養生したケースを示しているが、800°C まで加熱したコンクリートにおいても $\text{Ca}(\text{OH})_2$ のピークが現れている。このことは再養生による再水和で $\text{Ca}(\text{OH})_2$ が生じたことを示すものである。

3.2 応力ひずみ曲線

図-4 (a) (b) に実験を行った全てのケースにおける応力

ひずみ曲線を示す。なお、図は加熱温度毎の比較ができるように横軸を $500 (\times 10^{-6})$ シフトしている。図-4 (a) の再養生無しでは、加熱温度の上昇に伴って応力ひずみ曲線の勾配が緩くなると共に、最大圧縮強度時のひずみ量も大きくなっている。また、加熱温度 500°C 以降の応力ひずみ曲線が S 字形の曲線を描いており、供試体冷却時における粗骨材の収縮がコンクリート内部に微細ひび割れを発生させていることを示している^{7), 8)}。さらに、800°C 以上の加熱では応力ひずみ曲線の形状がほぼ崩壊しており、上記の微細ひび割れによりコンクリート供試体が粒状になり、その重なりによりかろうじて形状を保っている様子が伺える。

一方、図-4 (b) の再養生有りでは、再養生による圧縮強度の回復による影響で応力ひずみ曲線の勾配がそれほど大きくなり、かつ最大圧縮強度時のひずみ量も比較的小さくなっている。加熱温度 950°C および 1,000°C の供試体は、供試体の外観観察や応力ひずみ曲線の初期接線勾配が急であること等から自立した供試体であることを確認したが、圧縮強度は 5N/mm^2 以下であった。

図-5 に加熱温度と最大圧縮強度時のひずみとの関係を示す。ひずみ量は加熱温度 600°C までの範囲において、加熱温度の増加に従ってほぼ直線的に増加する傾向を示す。また、ひずみ量は再養生有りの方が若干小さいよう

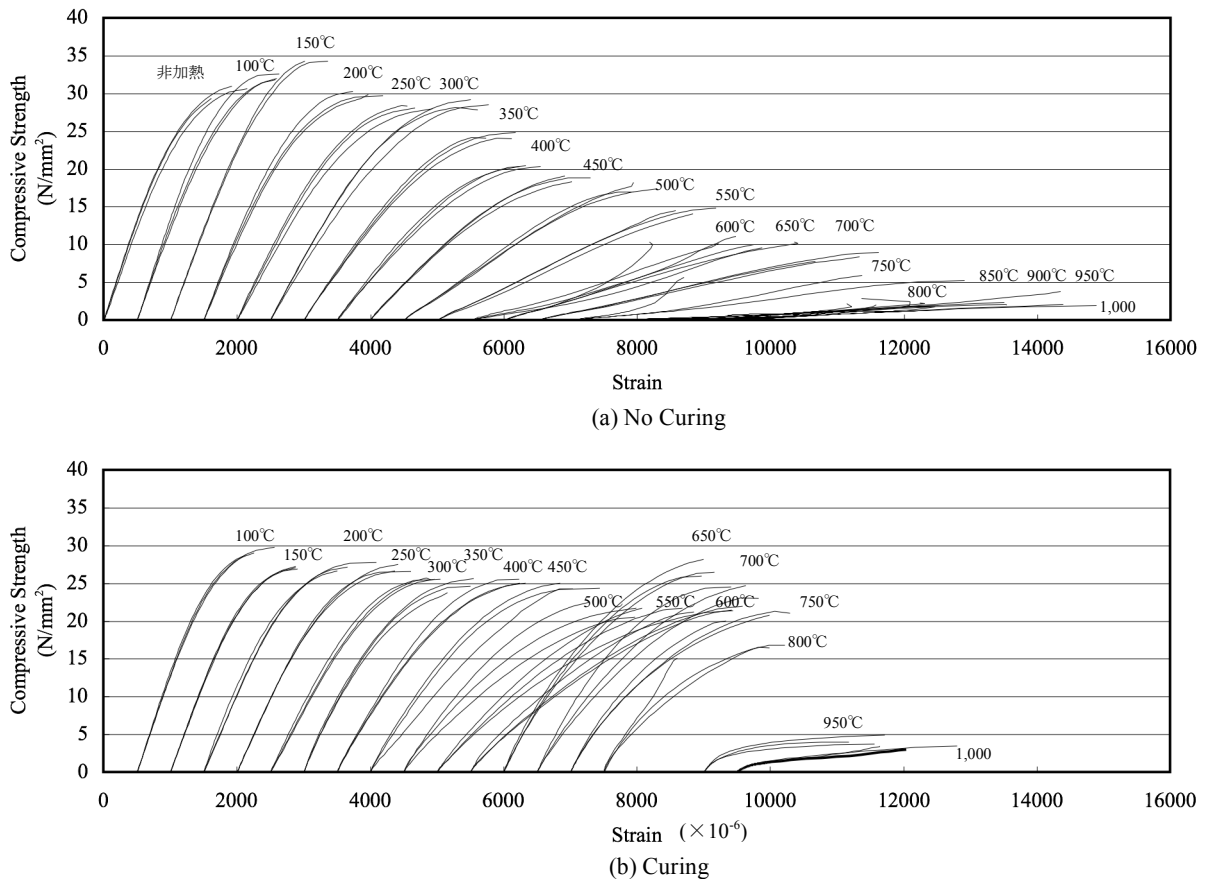


図-4 加熱したコンクリートの応力ひずみ曲線

であるが、再養生の有無に関わらずほぼ同じである。しかしながら、600℃以上の範囲においては、再養生有りのひずみ量が加熱温度の増加とともに小さくなる傾向を示した。このことは、供試体があまり変形を生じないで破壊することを示しており、再養生されたコンクリート供試体が脆性的な破壊を生じる方向に変化したことを示すものと考えられる。

3.3 加熱温度と弾性係数

図-6(a)に加熱温度と静弾性係数との関係を、図-6(b)に加熱温度と動弾性係数との関係を示す。

加熱直後に圧縮試験を行ったコンクリート（再養生無し）においては、加熱温度の上昇に伴って静弾性係数および動弾性係数の両者とも低下する傾向を示した。図-6(a)には、構造材料の耐火性ガイドブック（日本建築学会）⁹⁾による弾性係数残存比の提案値もあわせて示しているが、本実験結果と提案値とは良く一致している。図-2に示した圧縮強度の場合では150℃付近で供試体の乾燥により一時的に強度が増加したが、静弾性係数や動弾性係数ではこのような傾向は見られなかった。

一方、再養生有りの静弾性係数と動弾性係数は、測定値のばらつきが大きいものの再養生無しの静弾性係数や動弾性係数より大きく、圧縮強度の回復による弾性係数の回復を良く反映しているものとなった。特に650℃において圧縮強度が大きく回復している場合には、静弾性

係数や動弾性係数も大きく回復している。

以上のことから、静弾性係数や動弾性係数は加熱によるコンクリートの劣化や養生による回復を敏感に反映する指標であると考えられる。

3.4 圧縮強度と弾性係数

図-7に圧縮強度と静弾性係数との関係を示す。圧縮強度と静弾性係数との関係については、日本建築学会「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説」により関係式が示されている¹⁰⁾。この関係式で示される曲線を図-7中に示すが、本実験により求められた傾向と関係式より表される傾向が異なっていることが分かる。図中で圧縮強度が30N/mm²付近の供試体は常温もしくは加熱温度100℃のものであるが、この供試体群の静弾性係数のみ日本建築学会で示されている関係式に合致し、それ以外は関係式を大幅に下回っている。このことから、加熱したコンクリートは圧縮強度が健全なコンクリートと同程度であっても、ペースト内部の微小ひび割れや骨材の温度劣化によりコンクリートの組織自体が脆弱になっており、静弾性係数が低く現れるものと予想される。また、加熱したコンクリートにおける圧縮強度と静弾性係数との関係が健全なコンクリートにおける圧縮強度と静弾性係数との関係と異なることから、加熱したコンクリートの圧縮強度は健全なコンクリートの静弾性係数から推定できないことが明らかになった。

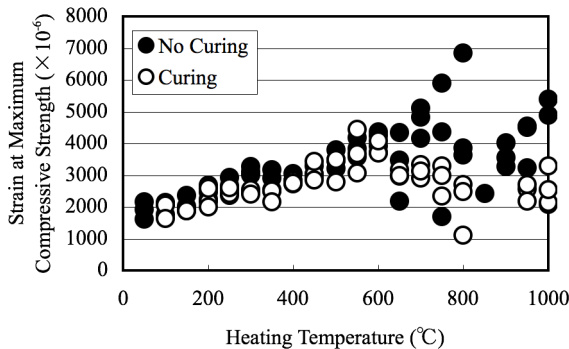


図-5 加熱温度と最大圧縮応力時のひずみ

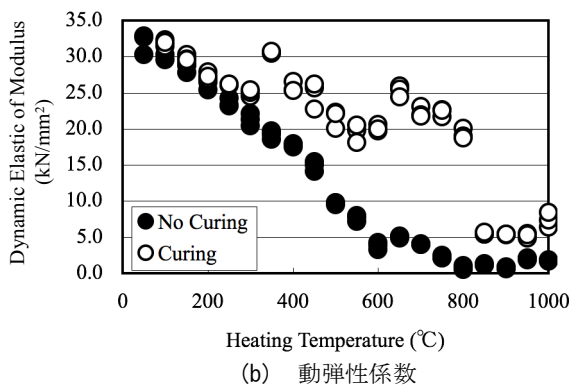


図-6 加熱温度と弾性係数との関係

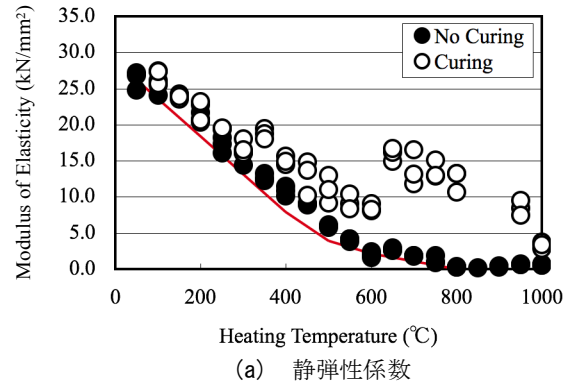


図-6 加熱温度と弾性係数との関係

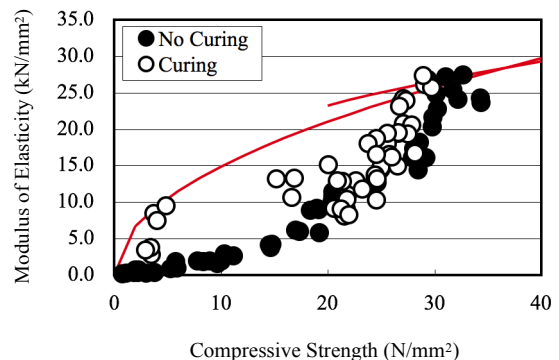


図-7 圧縮強度と静弾性係数との関係

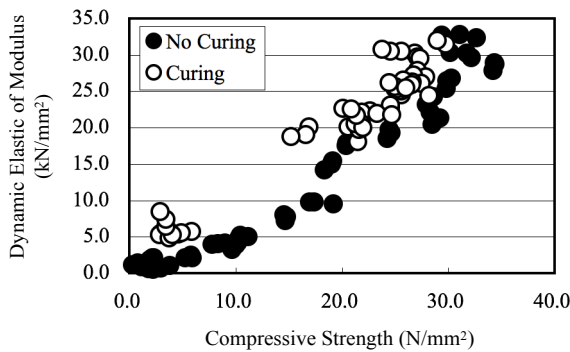


図-8 圧縮強度と動弾性係数との関係

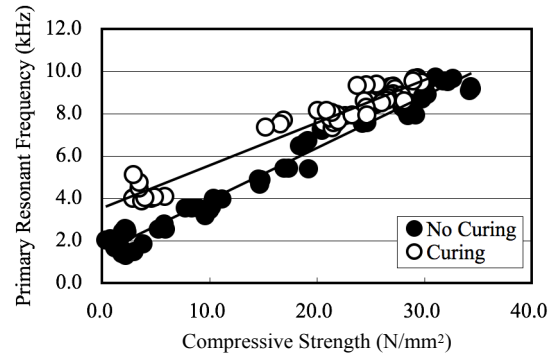


図-9 圧縮強度と1次共鳴振動数との関係

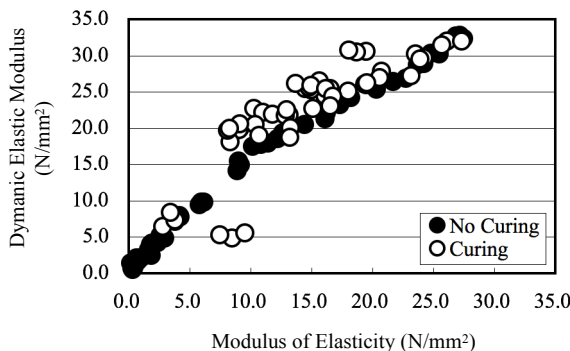


図-10 静弾性係数と動弾性係数との関係

再養生有りの供試体については、静弾性係数の値は若干関係式の方向に改善するものの、養生無しのケースとほぼ同じ値を示すこととなった。このことは、加熱されたコンクリートは再養生によりある程度の圧縮強度の回復が見込まれるものの、コンクリートの組織自体が完全に元通りに復元される訳ではないことを表している。

図-8に圧縮強度と動弾性係数との関係を示す。加熱により圧縮強度が低下するにつれて動弾性係数も低下するが、再養生の有無によりその傾向が異なり、同じ圧縮強度であっても再養生有りの供試体の動弾性係数が若干大きく測定された。図-9に圧縮強度と一次共鳴振動数との関係を示す。一次共鳴振動数は圧縮強度に比例するが、圧縮強度が低くなるほど再養生の有無による差が大きくなることが確認できる。再養生したコンクリート供試体の動弾性係数は、水中養生によりコンクリート内部に水が入り込み、音の伝搬速度が増すことから動弾性係数が大きくなることが報告されている¹¹⁾。本実験における再養生の有無による動弾性係数の差も、水中養生によりコンクリート中に入り込んだ水の影響で音の伝搬速度に差が生じたことによるものと考えられ、言い換えれば加熱により圧縮強度が低下したコンクリート中には、再養生による水が入り込むような微細なひび割れや空隙が多く存在しているものと推察される。

3.5 静弾性係数と動弾性係数

図-10に静弾性係数と動弾性係数との関係を示す。再

養生無しの供試体については、静弾性係数と動弾性係数はほぼ直線的に比例していることから、動弾性係数を測定することで静弾性係数の推定が可能である。しかし、静弾性係数に比較して動弾性係数が20%～50%程度大きくなる傾向を示した。一般的に動弾性係数は静弾性係数より10%程度大きくなるとされている¹²⁾が、今回の結果はそれよりも大幅に増加していることから、加熱によるマイクロクラックの影響が大きかったものと推察される。

一方、再養生有りの供試体については、静弾性係数の大きい部分と小さい部分において再養生無しの傾向と一致するものの、中間部においては大きく逸脱する傾向を示した。先に述べたように、動弾性係数は供試体中の含水率が高くなると大きくなる傾向を示す。この範囲の供試体は400℃～800℃に加熱された後に再養生されたものであることから、Ca(OH)₂やCaCO₃の熱分解で生じたCaOの再水和が生じた範囲であると思われる。したがって、セメントペースト中には多量の水分が含まれると考えられることから、このことがこの部分の動弾性係数を特に高くした原因であると推察される。

4. まとめ

高温加熱を受けたコンクリートおよび高温加熱後に水中養生を施したコンクリートの圧縮強度と弾性係数との関係を明らかにするために、100℃から1,000℃まで加熱したコンクリートについて圧縮強度、静弾性係数、動弾性係数を測定した。本研究範囲内で以下の知見を得た。

(1) 高温加熱を受けたコンクリートは、加熱温度が高くなるほど圧縮強度が低下するものの、再養生を行うことにより800℃以下の加熱において約60%程度まで圧縮強度が回復した。特に加熱温度650℃の再養生において圧縮強度の回復が大きかったが、これはCaOの再水和による効果が大きいものと思われる。

(2) 高温加熱後再養生を行ったコンクリートは、応力ひずみ曲線において最大圧縮強度時のひずみ量が小さく、脆性的な破壊を示す傾向がある。

(3) コンクリートの弾性係数は、加熱によるコンクリートの劣化や再養生による回復に敏感であることから、圧縮強度よりもコンクリートの状態を表す指標になり得る。

(4) 高温加熱を受けたコンクリートの圧縮強度と静弾性係数との関係は、健全なコンクリートのそれとは全く異なる。再養生により強度が回復したコンクリートであっても静弾性係数は健全なものより小さくなる。

(5) 高温加熱を受けたコンクリートの静弾性係数と動弾性係数は比例関係にあり、動弾性係数から静弾性係数の推定が可能である。本実験では、動弾性係数は静弾性係数に比較して20%~50%程度高くなった。

謝辞

本研究は「文部科学省廃止措置研究・人材育成推進事業」で採択された「廃炉に関する基盤研究を通じた創造的人材育成プログラム-高専間ネットワークを活用した福島からの学際的なチャレンジ-」の成果の一部である。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1)日本コンクリート工学会：高温環境下におけるコンクリートの性能評価に関する研究委員会報告書，2017
- 2)加藤優志，五十嵐豪，西脇智哉：1150℃までの高温履歴を受けたセメント硬化体の力学的性質，コンクリート工学年次論文集，Vol.38，No.1，pp.687-692，2016
- 3)緑川猛彦，車田研一，林久資：高温加熱を受けたモルタルの熱劣化と再養生のメカニズムについて，第44回セメント・コンクリート研究討論会論文報告集，pp.59-62，2017
- 4)一瀬賢一，川口徹，長尾覚博，河辺伸二：高温加熱を受けた高強度コンクリートの強度回復，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.1，pp.353-358，2003
- 5)田中弘文，戸谷陽一，斉藤豊：セメント硬化体の加熱後の性質と再水和，セメント・コンクリート，No.434，pp.34-40，1983
- 6)依田和久，新谷彰，間宮尚，青木孝一：加熱した再生微粉末の再水和性に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.2，pp.415-420，2008
- 7)安倍武雄，古村福次郎，戸祭邦之，黒羽健嗣，小久保勲：高温度における高強度コンクリートの力学的特性に関する基礎的研究，日本建築学会構造系論文集，第515号，pp.163-168，1999
- 8)鈴木好幸，山田人司：高温加熱した高強度コンクリートの力学的性質に関する実験的研究，ハザマ研究年報，Vol.43，pp.1-12，2011
- 9)日本コンクリート工学会：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，2012
- 10)日本建築学会：鉄筋コンクリート構造設計規準・同解説-許容応力度設計法-，1999
- 11)岡島達雄，石川時雄：セメント硬化体の弾性定数および超音波伝搬速度に及ぼす含水率の影響，セメント技術年報，Vol.35，pp.126-129，1981
- 12)一瀬賢一，長尾覚博：高温加熱を受けた高強度コンクリートの力学的性質に関する研究，大林組技術研究所報，No.57，pp.39-44，1998