

論文 高温加熱を受けた高強度モルタルの力学的性状

都築 正則^{*1}・一瀬 賢一^{*2}・溝淵 麻子^{*3}

要旨：高温加熱を受けた高強度モルタルの力学的性状に着目し，加熱温度および加熱後の養生方法の違いによる圧縮強度および静弾性係数に及ぼす影響について実験を行い以下のことが明らかになった。加熱後の圧縮強度残存比は，加熱温度 200 ~ 600 の範囲ではモルタルの方がコンクリートよりも1割程度大きく，加熱後の水中養生により，加熱温度 600 であれば，加熱前の9割程度の回復が認められた。また，静弾性係数残存比においては，コンクリートよりもモルタルの方が大きく，加熱温度が500 程度であれば，水中養生後は，静弾性係数は加熱前の約7割程度の回復が認められた。

キーワード：高強度モルタル，高温加熱，圧縮強度，静弾性係数

1. はじめに

近年，設計基準強度 60N/mm² 級の高強度コンクリートを用いた鉄筋コンクリート造が，集合住宅を中心に大都市部だけでなく地方都市においても多数施工されてきている。鉄筋コンクリート造は，通常耐火構造として認められているが，火災が生じるとその再使用においては，材料・構造面における劣化診断が必要となる。劣化診断では，受熱温度の推定が最も重要であり，推定結果に基づき構造体の補修・補強が行われる。

コンクリートに関しては，高温加熱後の力学的性質の把握が重要であり，研究報告も増えつつある¹⁾。普通強度のコンクリートの場合，受熱温度が 500 以内であれば，受熱後ある期間が経過すると強度が回復し再使用に耐えられるまで復元し，静弾性係数についてもある程度復元することが報告されている²⁾。力学特性の回復が定量的に期待できるのであれば，火災後の補修・補強範囲も軽減できる可能性がある。しかし，高強度コンクリートにおける力学特性の回復に関する研究はまだ少なく^{3)~6)}，メカニズムも解明されていない。加熱を受けたコンクリートは，水和物の化学的な変質のほか，加熱温度が約100 を超えると骨材は膨張するのに対し，ペースト部分は膨張から収縮に移行する¹⁾。このため，骨材界面を起点として微細ひび割れが進展し，力学的性状に影響するものと推定される。特に，粗骨材の影響を評価するにはモルタル部分の力学的性状の把握⁷⁾が重要となる。

筆者らは，前報⁸⁾で，高温加熱を受けた高強度コンクリートの力学的特性の回復に着目し，加熱温度および養生方法の違いによる圧縮強度および静弾性係数に及ぼす影響について実験的に検討を行った。本報告では，前報⁸⁾と同等のコンクリートから粗骨材を除き採取したモルタルを対象として，100 ~ 600 の高温加熱後の力学的性状，

およびその後の養生方法の違いによる力学的性状に与える影響について実験的に検討および考察を行った。なお，実験結果には前報⁸⁾のコンクリートデータも併記した。

2. 実験概要

2.1 使用材料と調合

採取モルタルの元となるコンクリートの調合を表 - 1 に示す。調合は水セメント比(W/C=)30%とし，目標空気量は3 ± 1%，目標スランプフロー値は60 ± 10cmとした。使用材料は，普通ポルトランドセメント(C)，細骨材(S)に陸砂，粗骨材(G)に硬質砂岩砕石を使用した。混和剤は，ポリカルボン酸系高分子化合物を主成分とする高性能AE減水剤を使用した。

2.2 実験条件

実験条件を表 - 2 に示す。対象とする供試体はモルタルとし，加熱温度は 100 ~ 600 の6水準，加熱後の養生方法を水中養生および気中養生の2水準，加熱後の養生期間は養生前も含め，56日までの4水準とした。

2.3 測定項目および方法

測定項目は質量変化，圧縮強度(JIS A 1108)，静弾性係

表 - 1 コンクリートの調合

W/C (%)	単位量 (kg/m ³)				混和剤 C× (%)
	W	C	S	G	
30	175	583	712	893	1.05%

表 - 2 実験条件

項目	摘要	水準数
対象供試体	モルタル	1
加熱温度	100°C, 200°C, 300°C, 400°C, 500°C, 600°C	6
加熱後の養生方法	水中養生, 気中養生	2
加熱後の養生期間	0日, 7日, 28日, 56日	4

*1 ㈱大林組 技術研究所 生産技術研究部 主任 工修 (正会員)

*2 ㈱大林組 技術研究所 生産技術研究部 主任研究員 工博 (正会員)

*3 ㈱大林組 技術研究所 生産技術研究部 主任 (正会員)

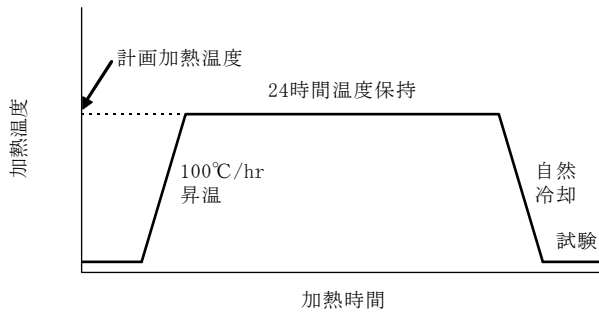


図 - 1 加熱および冷却方法

数 (JIS A 1149), 動弾性係数 (JIS A 1127) とし, 測定材齢は加熱前, 加熱後の養生前, 加熱後の養生後とした。供試体寸法は 100×200mm, 試験結果は3本の平均値とした。

2.4 供試体作製および養生方法

コンクリートの混練は, 容量100Lの強制練りミキサを使用した。供試体は, コンクリートのフレッシュ性状を測定した後, 5mmふるいにてウェットスクリーニングしたモルタルを採取した。コンクリートのフレッシュ性状は, フロー値 63.0 ~ 66.0cm, 空気量 3.3 ~ 3.5% を示し, 目標値を満足した。

供試体は打設後翌日まで 20 ± 3 の恒温室内で湿潤養生を行った。翌日, 脱型を行い材齢 56 日まで標準水中養生とした。また, 材齢 56 日から材齢 91 日まで封かん養生とし, その後加熱試験を行った。

2.5 加熱方法

加熱および冷却方法を図 - 1 に示す。加熱試験は材齢 91 日から実施した。加熱は電気炉を使用し, 加熱時の供試体は水分が逸散するアンシール状態とした。加熱の升温速度は, プログラムにより調整し, 100 / 時間とした。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にその温度を 24 時間保持させた。冷却の降温速度は, 炉内ファンを作動させることによる自然冷却とした。供試体は, 炉内温度が 50 以下になるまで放置した。各強度試験は, 降温から 5 ~ 12 時間後, 常温下の条件のもと行った。

2.6 加熱後の養生方法および養生期間

加熱後の供試体は, 養生前に試験を行うもの(以下, 「加熱後養生前」と称す。)を除き, 標準水中養生および 20 ± 3 , $60 \pm 5\%$ R.H. の恒温恒湿室内において気中養生を行った。養生期間は, 加熱後最大 56 日までとし, 養生期間 7 日, 28 日および 56 日において強度試験を行った。

3. 実験結果および考察

3.1 加熱後養生前の質量変化

加熱温度と質量変化率(加熱前の単位容積質量に対する加熱前後の単位容積質量の差を百分率で示したものの)の関係を図 - 2 に示す。各供試体とも加熱温度が大きいほどその水分逸散は大きくなり, 加熱温度 200 からモルタルとコンクリートの各質量変化率が異なる傾向を示した。こ

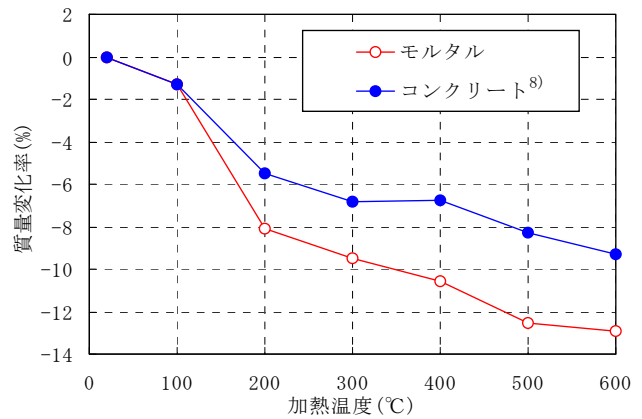


図 - 2 加熱温度と質量変化率

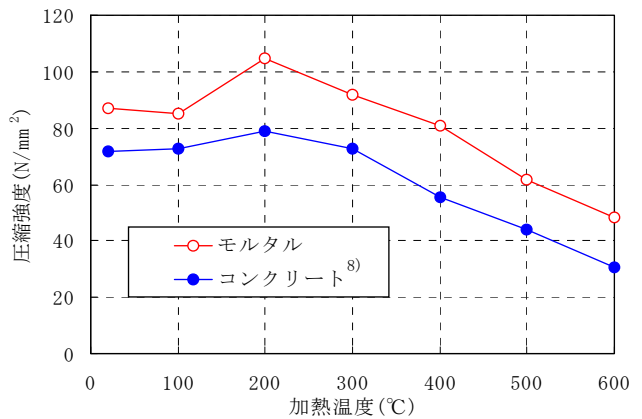


図 - 3 加熱温度と圧縮強度

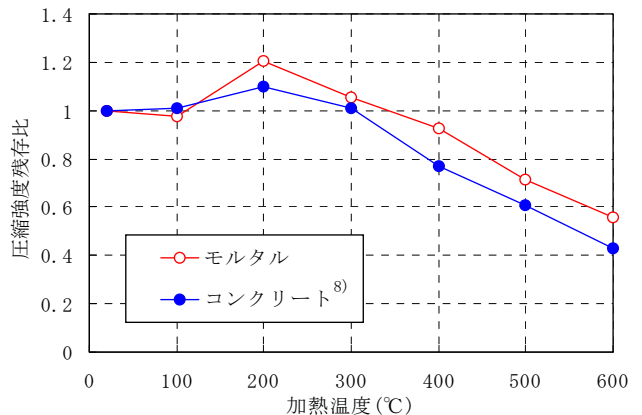


図 - 4 加熱温度と圧縮強度残存比

れは粗骨材の体積分の容積が質量含水率の大きいモルタルに置換されたためである。加熱温度 200 からモルタルの質量変化率はコンクリートの約 1.4 倍程度であり, 加熱温度 600 においては, その値は - 13% 程度であった。

3.2 加熱後養生前の圧縮強度

加熱温度と圧縮強度および圧縮強度残存比(加熱前の強度に対する加熱後の強度の比)の関係を, 図 - 3 および図 - 4 に示す。コンクリート同様, モルタルも加熱温度 300 までは常温時と同程度もしくは高い強度を示し, 300 以上になると強度低下を示した。これはコンクリートにおける既往の研究³⁾の通り, 各組成物の熱膨張歪みの違いや, 未水和セメント粒子の水和促進が複雑に影響し

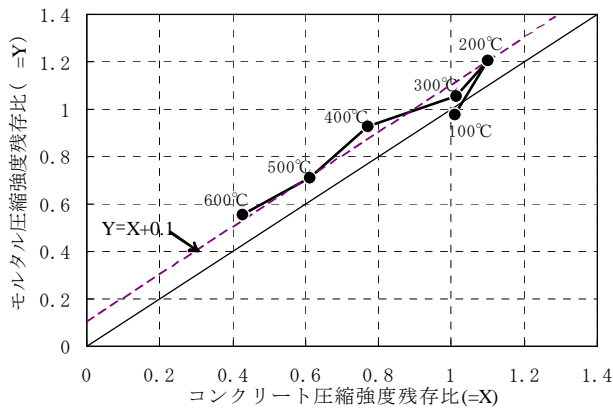


図 - 5 圧縮強度残存比の比較(加熱直後)

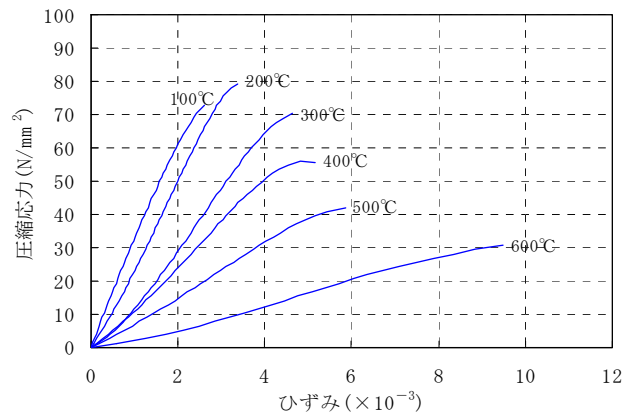


図 - 6 モルタルの応力ひずみ曲線

ていると考えられる。また、モルタルの圧縮強度はコンクリートよりも約 $10 \sim 25 \text{ N/mm}^2$ 程度大きい値であった。圧縮強度残存比において、モルタルは加熱温度 200 において約 1.2 倍程度強度増進し、加熱温度 600 で常温時の約 6 割の強度を残存した。

モルタルとコンクリートの強度残存比の比較を図 - 5 に示す。加熱温度 300 からの強度低下における過程において、モルタルの強度残存比は、コンクリートよりも約 1 割程度大きい値を示した。モルタルの方がコンクリートより強度残存比が大きい理由としては、粗骨材が含まれているコンクリートの方が材料として不均一なため、加熱および冷却過程で生じる骨材界面の微細ひび割れが入りやすいためと考えられる。また、両者の強度残存比の差が 200 以降変わらないのは、モルタルはコンクリートよりもセメントペーストの割合が多いため、加熱温度 200 において、未水和セメントの高温蒸気による水和促進の割合がコンクリートよりも大きかったことが影響しているためと考えられる。

3.3 加熱後養生前の静弾性係数

モルタルの応力ひずみ曲線を図 - 6 に示す。曲線は加熱温度 300 から大きく傾く傾向を示した。また、加熱温度 $100, 200$ は直線的な勾配を示すのに対し、 300 以上であるとその曲線が若干 S 時型を示している。これは文献 ³⁾ で考察されるように、加熱による熱応力およびセメントペーストおよび細骨材の膨張収縮が引き起こした供試体内部の微細ひび割れによる影響と考えられる。

加熱温度と静弾性係数の関係を図 - 7 に示し、加熱温度と静弾性係数残存比(加熱前の静弾性係数に対する加熱後の静弾性係数の比)の関係を図 - 8 に示す。モルタルの静弾性係数は、コンクリート同様、加熱温度が大きくなるに従い、小さくなる傾向を示した。静弾性係数残存比は、加熱温度 600 では、コンクリートと同様、常温時の約 1 割程度まで低下した。

モルタルとコンクリートの静弾性係数残存比の比較を図 - 9 に示す。加熱温度 200 におけるモルタルの静弾性

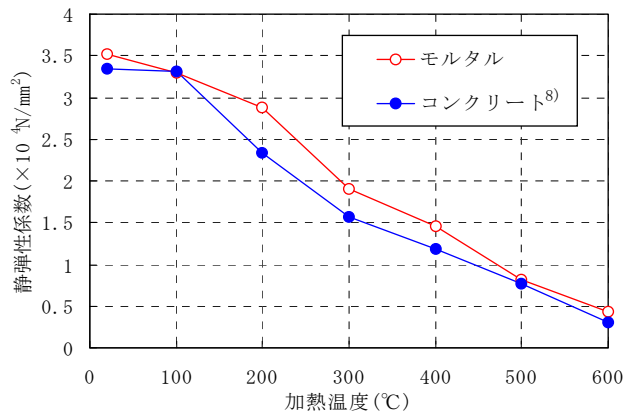


図 - 7 加熱温度と静弾性係数

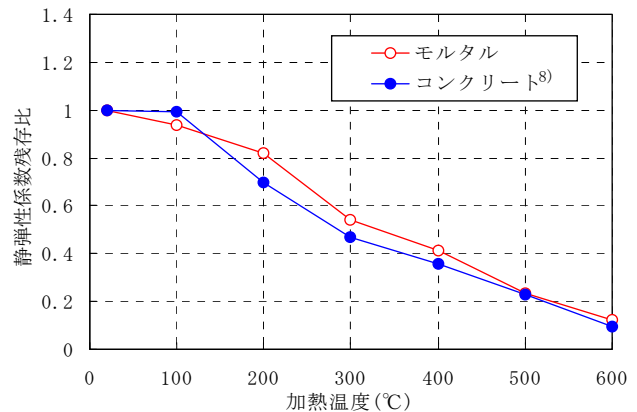


図 - 8 加熱温度と静弾性係数残存比

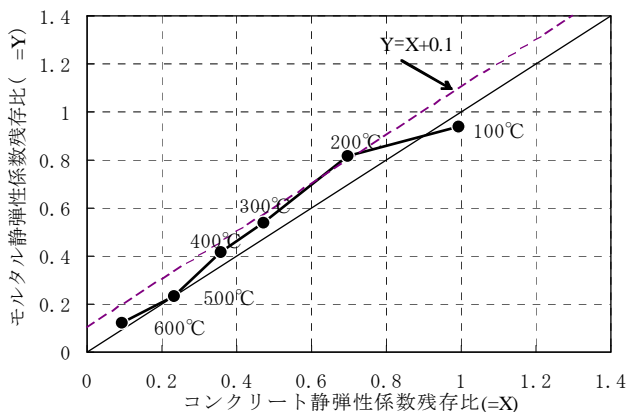


図 - 9 静弾性係数残存比の比較(加熱直後)

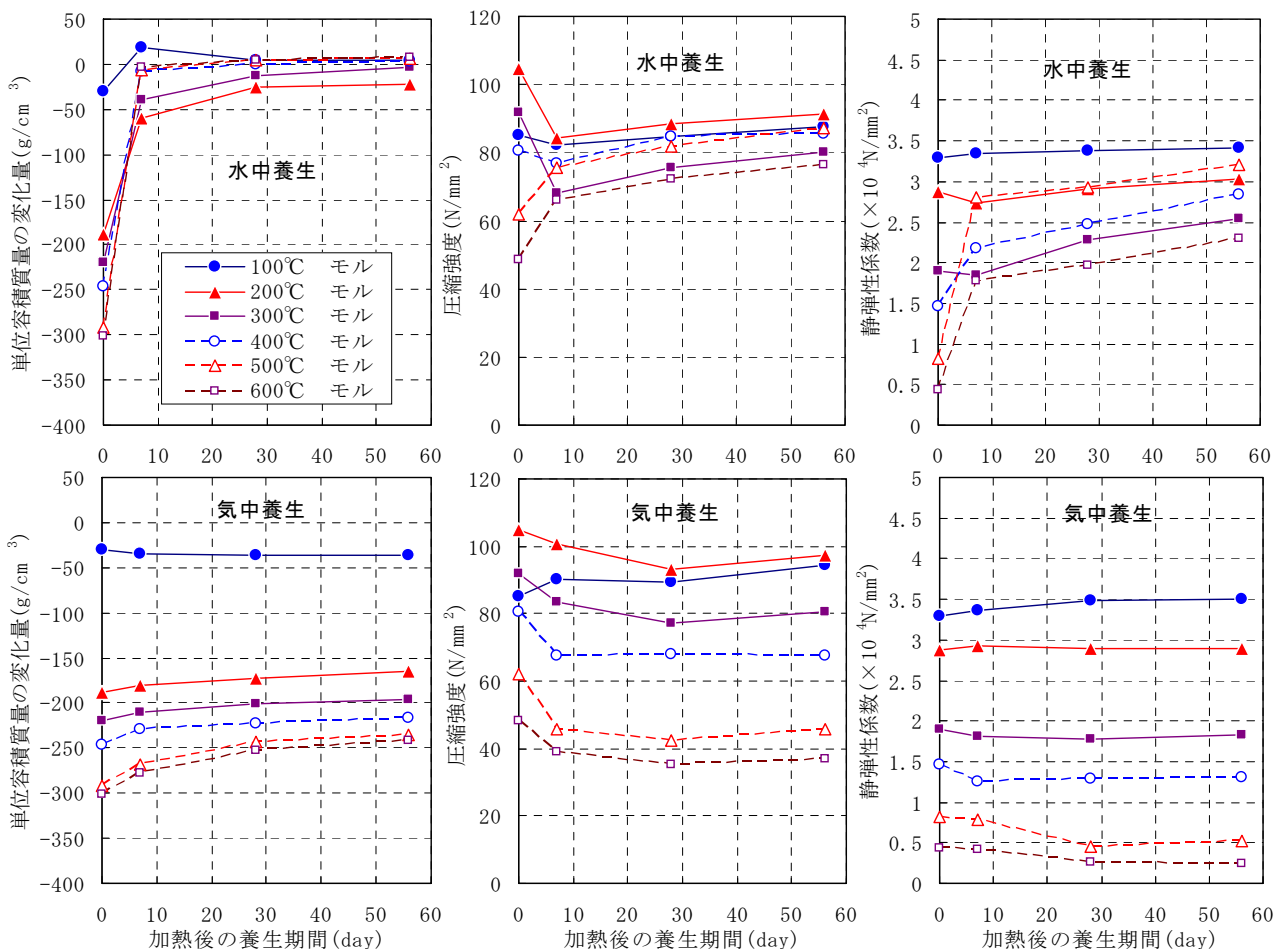


図 - 10 モルタル供試体の単位容積質量の変化量，圧縮強度，静弾性係数(上段：水中養生，下段：気中養生)

係数残存比はコンクリートよりも1割程度大きい値となり，両者の差は，200 以降になると狭くなっていく傾向を示した。これは，圧縮強度残存比の場合と同様，粗骨材界面に入る微細ひび割れが影響しているためと考えられる。また，加熱温度が大きくなるほど，モルタルとコンクリートの微細ひび割れの発生量は同等になり，結果，同程度の残存比になると考える。

3.4 加熱後の養生期間と力学的性状の関係

加熱後からの水中および気中養生期間と，その期間におけるモルタルの単位容積質量の変化量，圧縮強度および静弾性係数の関係を図 - 10 に示す。

単位容積質量の変化量において，水中養生を行った供試体は，養生期間7日までの吸水量が大きく，約 -50g/cm^3 程度まで変化している。またその吸水量は，加熱温度200，300 に比べて，400～600 の供試体のほうが大きかった。これは加熱により生じたひび割れのため，供試体が吸水しやすい状態であったためと考えられる。気中養生を行った供試体は，雰囲気湿度のため若干吸水し，加熱後養生前よりも200～400 は 25g/cm^3 前後，500，600 は 60g/cm^3 前後，単位容積質量が増加した。

圧縮強度は，水中養生を行った供試体の場合，養生期間7日までと7日～56日までで，加熱温度によって強度増進

が異なる傾向を示した。養生期間7日までは，加熱温度200～400 の供試体は加熱後養生前よりも強度低下が生じ，加熱温度500，600 の供試体は強度増進した。この原因は定かではないが，加熱に伴う供試体表面の乾燥により見かけ上の圧縮強度が大きくなったが⁹⁾，水中養生時の吸水によりその応力が緩和され強度低下が生じたもの(以下，見掛けの強度低下と称す。)と考えられる。一方，加熱温度500，600 の供試体は微細ひび割れの発生による強度低下が大きく，脱水により生じた養生期間7日までの再水和による生成物(=脱水により生じたCaOと水によるCa(OH)₂の生成¹⁰⁾)が強度回復に繋がり，それが見掛けの強度低下以上であったため強度が大きくなったと考えられる。養生期間7日以降は，各供試体とも水和による強度増進により圧縮強度は80～90N/mm²程度の範囲を示した。

気中養生を行った供試体は，加熱後養生前から7～16N/mm²程度の強度低下が生じた。これは供試体の乾燥による微細ひび割れの拡大による強度低下または，供試体周囲の雰囲気湿度により供試体表面部が若干吸水することによる見掛けの強度低下によるものと考えられる。

静弾性係数は，水中養生期間7日までににおいて，加熱温度500，600 の供試体の静弾性係数の回復が大きかつ

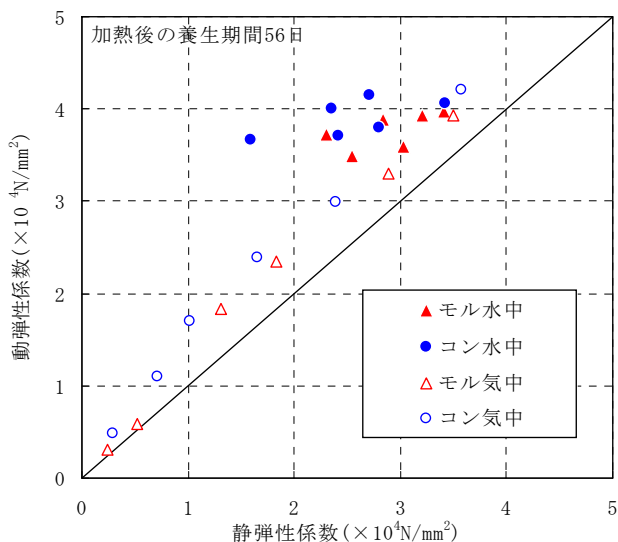


図 - 11 静弾性係数と動弾性係数の比較

た。これは圧縮強度同様、微細ひび割れを埋める様に再水和していることが推定される。養生期間7日以降は全ての供試体において、若干、静弾性係数は回復する傾向にあった。気中養生の供試体は、養生期間によらずほぼ一定の値を示し、加熱後養生前から回復していない。

3.5 養生後の静弾性係数と動弾性係数の関係

加熱後の養生期間56日における静弾性係数と動弾性係数の関係を図 - 11 に示す。モルタルもコンクリート同様の傾向が認められた。気中養生においては両者に相関関係が認められた。水中養生においては、動弾性係数は静弾性係数よりも大きな値を示した。これは加熱後の水中養生により供試体の内部に水が入り込んだ結果、動弾性係数が大きくなったものと考えられる¹⁾。

3.6 養生期間56日における供試体の硬化性状

加熱温度と加熱後の養生期間56日における質量変化率の関係を図 - 12 に示す。気中養生後では、加熱温度が高くなるにつれその変化率は大きくなり、モルタルは加熱600 で10%程度減少し、コンクリートの約1.6倍程度であった。水中養生後では、モルタルおよびコンクリートともに吸水し、質量変化率はほぼ0%程度と加熱前の含水状態まで回復した。

加熱温度と圧縮強度残存比の関係を図 - 13 に示す。気中養生では、加熱温度が大きくなるにつれモルタルおよびコンクリート共に強度残存比は小さくなり、加熱温度600 程度で常温時の4割程度の強度となった。一方水中養生後は、加熱温度500 までであれば、コンクリートにおいて8~9割程度の強度を示すのに対し、加熱温度600 までであれば、モルタルでは9割程度の強度を示した。

加熱温度と静弾性係数残存比との関係を図 - 14 に、動弾性係数残存比との関係を図 - 15 に示す。気中養生において、静弾性係数残存比および動弾性係数残存比と共に、加熱温度が大きくなるにつれ、その残存比は小さくなり、

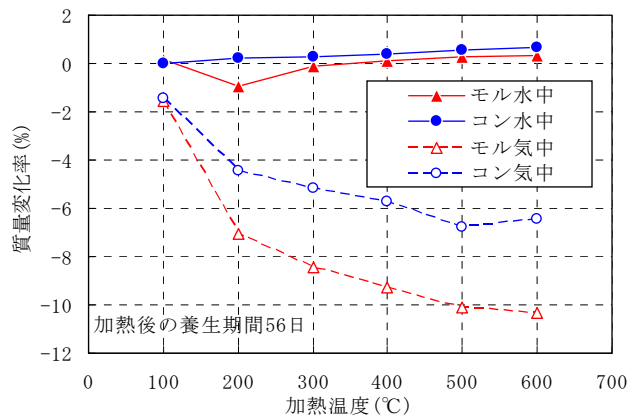


図 - 12 加熱温度と質量変化率(養生後)

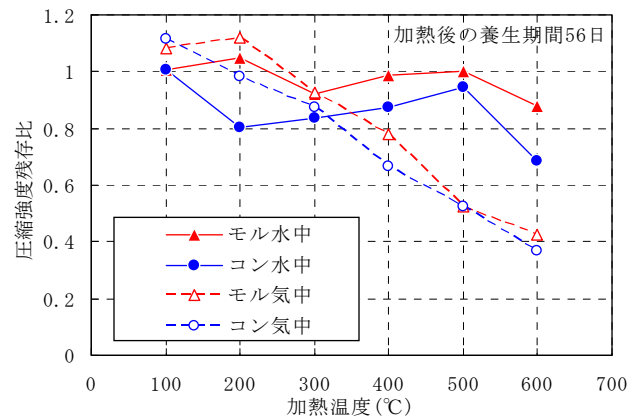


図 - 13 加熱温度と圧縮強度残存比(養生後)

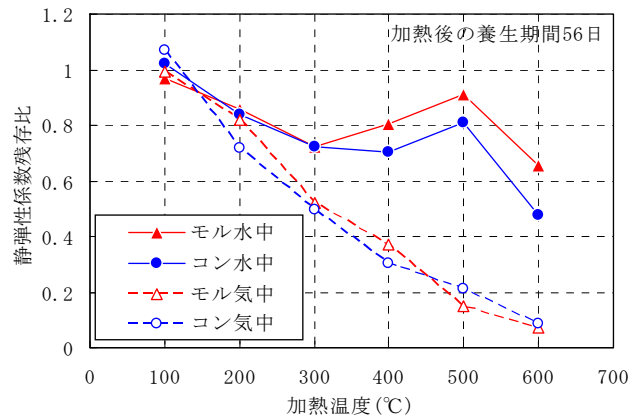


図 - 14 加熱温度と静弾性係数残存比(養生後)

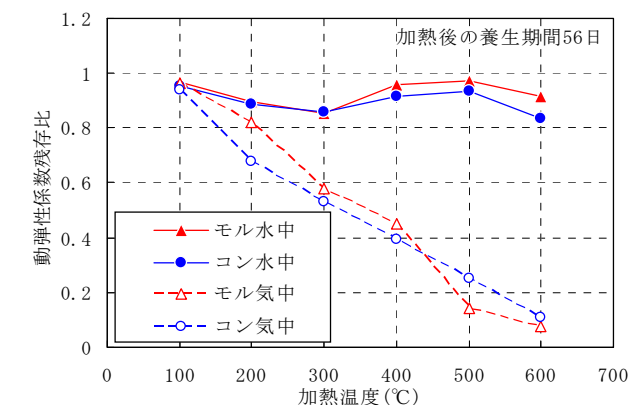


図 - 15 加熱温度と動弾性係数残存比(養生後)

コンクリートおよびモルタル共に加熱温度600 程度で常温時の1割程度となった。水中養生において、静弾性係数は加熱温度が500 程度であれば、加熱前の約7割程度の回復が認められ、その残存比は、コンクリートよりもモルタルの方が大きい結果となった。また、水中養生時における動弾性係数残存比は、加熱温度600 程度であればコンクリート、モルタル共に8割程度の回復が認められた。

加熱後養生前から養生期間56日までの質量変化率の増分と圧縮強度残存比の増分との関係を図 - 16に、静弾性係数残存比の増分との関係を図 - 17に示す。質量変化の増分(つまり、水中養生時の吸水)によって圧縮強度の回復が顕著なものは、コンクリートでは加熱温度300 ~ 500 であり、モルタルでは加熱温度400 ~ 600 であった。静弾性係数の回復が顕著なものは、コンクリートでは加熱温度200 ~ 500 のものであり、モルタルでは300 ~ 500 のものであった。これらのことから、高強度コンクリート、モルタルは、加熱温度300 ~ 500 の範囲であれば、加熱後の水分供給は、加熱後養生前の強度および静弾性係数を増進することが認められた。

4. まとめ

高温加熱を受けた高強度モルタル力学特性の回復に着目し、加熱温度および加熱後の養生方法の違いによる圧縮強度および静弾性係数に及ぼす影響について実験を行い以下のことが明らかになった。

- (1) 加熱温度200 ~ 600 の範囲では、加熱後の圧縮強度残存比は、モルタルの方がコンクリートよりも1割程度大きい。
- (2) 加熱温度500 までであれば、水中養生後はコンクリートにおいて加熱前の8 ~ 9割程度の強度を示すのに対し、モルタルでは加熱温度600 まで9割程度の強度であった。
- (3) 加熱温度が500 までであれば、水中養生後は、静弾性係数は加熱前の約7割程度の回復が認められ、その残存比はコンクリートよりもモルタルの方が大きい。
- (4) 加熱後の養生前と比較すると、加熱温度300 ~ 500 の範囲で、コンクリートおよびモルタル共に吸水による強度および静弾性係数の増進が顕著であった。

参考文献

- 1) 日本建築学会：構造材料の耐火性ガイドブック，2009.3
- 2) 原田有：建築耐火構法，工業調査会，1973.8
- 3) 安倍武雄ほか：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.163-168，1999.1
- 4) 土井文好ほか：超高強度コンクリートの熱的性質に

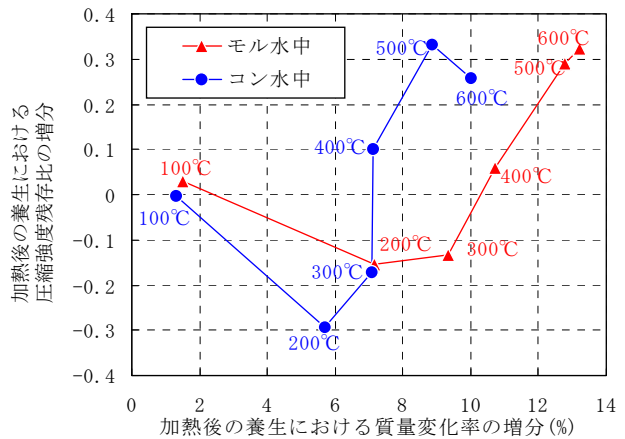


図 - 16 加熱後の養生における質量変化率と圧縮強度残存比回復の比較

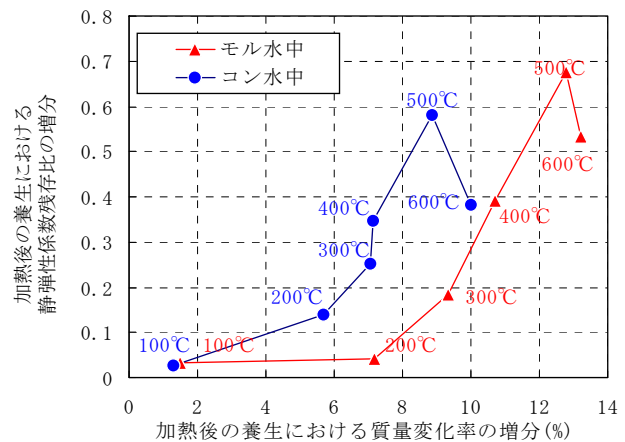


図 - 17 加熱後の養生期間における質量変化率と静弾性係数残存比回復の比較

に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.15，No.1，pp.109-114，1993

- 5) 西田浩和ほか：超高強度コンクリートの構造体強度と高温加熱後の力学的性質，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.26，No.1，pp.393-398，2004
- 6) 松戸正士ほか：高温加熱後の超高強度コンクリートの力学的性質に関する実験的研究，日本建築学会構造系論文集，第603号，pp.171-177，2006.5
- 7) 廣畑光生ほか：高温加熱後の高強度コンクリートの力学的性質，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.19，No.1，pp.625-630，1997
- 8) 一瀬賢一ほか：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報告集，Vol.25，No.1，pp.353-358，2003
- 9) Bureau of Reclamation：Concrete Manual 8th ed，1977
- 10) 田中弘文ほか：セメント硬化体の加熱後の性質と再水和，セメント技術年報，No.36，pp.45-48，1982
- 11) 岡島達雄ほか：セメント硬化体の弾性定数および超音波伝播速度に及ぼす含水率の影響，セメント技術年報，No.35，pp.126-129，1981