

# 高温を受けるコンクリート部材の諸物性に関する研究 (その2)

——600°C加熱時の強度・弾性係数——

長尾 覚博 中根 淳

## Experimental Studies on Characteristics of Concrete Members Subjected to High Temperature (Part 2)

——Strength and Elasticity when heated up to 600°C——

Kakuhiro Nagao Sunao Nakane

### Abstract

It is necessary to take into account the temperature dependency of the physical properties of concrete when estimating the quality of concrete structures expected to be subjected to high temperatures. However, there are only a few examples of research in relation to characteristics of concrete heated over 200°C.

Research was carried out with such a background and the results with regard to compressive strength, elasticity, tensile strength, and weight change after heating up to 600°C are summarized in this report, thereby explaining the characteristics of concrete subjected to high temperatures over 200°C.

### 概 要

高温を受けることが予想されるコンクリート構造物の品質評価においては、コンクリート物性の温度依存性を考慮する必要がある。一方、200°C以上の温度範囲における物性変化に関するデータは少なく、十分高温特性が明らかになっているとはいえない。この報告は、このような背景に基づき、コンクリートが200°Cを超える温度を受けたときにどのような物性変化を示すかを明らかにするため、600°Cまで加熱された各種コンクリートの圧縮強度、割裂強度静弾性係数、重量変化について実験的に調査した結果をまとめたものである。

### 1. はじめに

この報告は、高温を受けるコンクリート部材の諸物性を明らかにするために、テストピースで300°C、600°C加熱時の圧縮強度、割裂強度、静弾性係数、重量変化について文献および実験により調査した結果をまとめたものである。

### 2. 既往の研究

実験計画の立案に先立ち、まず文献調査を実施した。国内外の約100編の文献により、加熱温度と圧縮強度残存比、弾性係数残存比、引張強度残存比との関係を調査し、その結果を図示したものが図1～3である。これより以下のことが指摘できる。

- (1) 200°Cを超える実験データは数少ない。
- (2) 加熱温度の上昇に伴い、圧縮強度、弾性係数は低下し600°Cではいずれの残存比も50%以下となる。

(3) 材料、調合などの影響は明らかでない。

(4) 加熱による劣化は圧縮強度よりも弾性係数の方が著しい。

(5) 普通ポルトランドセメントを用いた実験例がほとんどで、フライアッシュB種など混合セメントを用いたものは非常に少ない。

(6) 引張強度のデータは、450°Cを超える温度域ではほとんど見当たらない。

(7) 加熱期間による差は顕著でなく、加熱初期に大きな変化を生ずる。

これらの結果より、この実験では主として文献的にデータの少ない混合セメントを用いたコンクリートについて、その高温特性を調査することとした。

### 3. 実験概要

文献調査の結果に基づき、実験では、普通ポルトランドセメントの他に各種セメントおよび骨材の岩質をパラ

メータとしたコンクリートについて、300°C、600°C加熱を受けたときの代表的物性値の変化を把握できるように計画した。

3.1. 測定項目

測定項目は以下のとおりである。

- (1) 圧縮強度
- (2) 静弾性係数
- (3) 割裂（引張）強度
- (4) 重量変化

3.2. 実験方法

3.2.1. 使用材料および調査

(1) 使用材料は以下のとおりである。

- セメント—普通ポルトランドセメント，フライアッシュセメントB種，高炉セメントB種，中庸熱ポルトランドセメント，アルミナセメント
- 骨材—硬質砂岩（2種類），玄武岩，高炉スラグ，石灰岩，耐火レンガ
- 混和剤—AE剤，AE減水剤

(2) コンクリートの調査条件

コンクリートの調査条件は下記のとおりで、試し練りによって調査を決定した。

- スランプ — 12±1.5 cm
- 水セメント比 (W/C) — 45, 55, 65%
- 空気量 — 4 ± 1 %

なお、単位水量および単位セメント量は使用材料によって差異があるが、W/C=55%で、それぞれ 160 kg/m<sup>3</sup>、300 kg/m<sup>3</sup>程度であった。

3.2.2. 実験条件 加熱温度、加熱前養生、供試体の寸法などの条件は表-1に示すとおりである。

3.2.3. 実験条件の組み合わせ 実験では、下記の影響要因について各物性の温度依存性を検討した。

- (1) 水セメント比 (W/C)
- (2) セメントの種類
- (3) 骨材の種類
- (4) 加熱前養生条件
- (5) 加熱開始材令

各検討項目毎の要因の組み合わせは、表-2に示すとおりである。

3.2.4. 加熱方法および加熱パターン 供試体の加熱は、高温流気式電気炉（マッフル炉）を用いた。その仕様は表-3に示すとおりである。

加熱温度は、300°C、600°Cで、その加熱パターンは図-4に示すとおりである。

3.2.5. 試験時の温度 各物性値とも、供試体の温度が常温に戻ってから試験した。

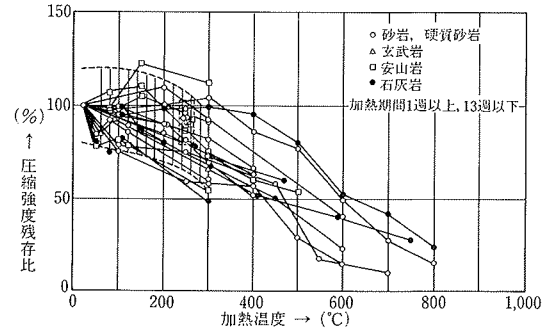


図-1 加熱温度と圧縮強度残存比（文献調査）

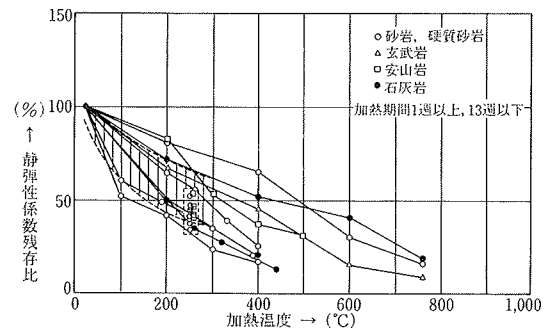


図-2 加熱温度と弾性係数残存比（文献調査）

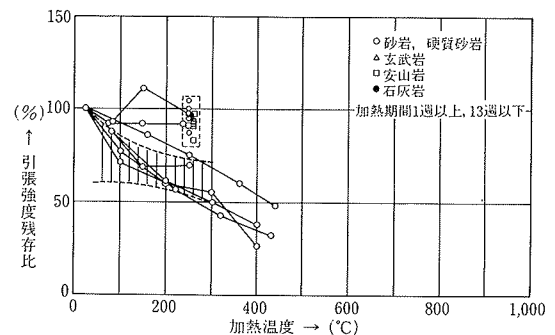


図-3 加熱温度と引張強度残存比（文献調査）

項目	条件
1) 対象温度範囲	常温、300°C、600°C
2) 加熱中の暴露条件	アンシール
3) 加熱期間	7日
4) 加熱速度	200°C/hr
5) 加熱前養生条件	・20±3°C 水中養生 ・20±3°C 封緘養生 ・20±3°C、65±5%RH 気中養生
6) 加熱開始材令	28日、91日
7) 一実験条件当たりの供試体数	3体
8) 供試体の寸法	・圧縮強度(弾性係数)—Φ100×200mm ・割裂(引張)強度—Φ150×150mm ・重量変化—圧縮強度用供試体、割裂強度用供試体を用いる

表-1 実験条件

3.3. 実験結果

加熱実験の結果は全て加熱前養生が、20±3℃の水中養生、封緘養生、気中養生の供試体の試験結果を基準とし、加熱後の値との比（残存比）で各物性の変化を評価した。

3.3.1. 供試体の温度変化 図-5 に昇温過程でのΦ10cm シリンダー供試体中心部の温度変化を示した。これより、いずれの養生条件の供試体とも加熱開始後約5時間で600℃に達している。

3.3.2. 加熱実験結果

(1) 加熱前後の供試体の様子

加熱前後の供試体の様子は実験条件ごとに差異があるが、600℃加熱についてその特徴をまとめると以下のとおりとなる。

- (a) 供試体の脱水により、表面が白色に変化する
- (b) (a)の変化に加えて、供試体の表面に微細なひびわれが入る。
- (c) (a), (b)の現象に加えて、ポップアウト現象を生ずる（写真-1）
- (d) (a), (b)の現象に加えて、剝離現象を生ずる（写真-2）
- (e) (a), (b)の現象に加えて、爆裂現象を生ずる（写真-3）

これらの変質は、コンクリートの耐熱性を論ずる際、強度・弾性係数の残存比と同様重要な評価項目となる。特に爆裂は300℃加熱では皆無であったが、600℃加熱では爆裂が認められた。表-4 は各検討項目毎の実験条件で作成した供試体のうち、爆裂したものの割合を示したものである。

これより、爆裂の頻度を主な要因ごとにまとめると以下のとおりとなる。

- 高炉セメントB種の爆裂の頻度が低い。
- 耐火レンガ、硬質砂岩(2)、玄武岩には爆裂が認められなかった。他の骨材には爆裂が認められ、特に高炉スラグの頻度が高い。
- W/C が小なる程爆裂の頻度が高い。
- 加熱開始材令が長くなる程爆裂の頻度が高い。
- 加熱前養生条件が水中養生のものは封緘、気中よりも頻度が高い。

これらのことより、高強度で緻密になる程、また含水率の高い程爆裂の頻度が高くなり、使用材料によっても頻度が異なると思われる。

(2) 圧縮強度

図-6 に加熱温度と圧縮強度残存比との関係を、セメント種別、W/C、骨材種別、加熱前養生条件、加熱開始材令、を影響要因として一括して示した。これより、全般

検討項目	セメント	骨材	水セメント比(%)	養生条件	加熱開始材令(日)	加熱温度(℃)
I. W/Cのの違いによる影響	・(普通ポルトランド) ・フライアッシュB種 ・(高炉セメント) ・(中磨熟) ・(アルミナ)	・硬質砂岩(1)	・45 ・55 ・65	・20±3℃ 水中	91	(300) 600
II. セメントの違いによる影響	・普通ポルトランド ・フライアッシュB種 ・高炉セメントB ・中磨熟 ・アルミナ	・硬質砂岩(1)	55	・20±3℃ 水中	91	(300) 600
III. 骨材の違いによる影響	フライアッシュB種	・硬質砂岩(1) ・硬質砂岩(2) ・石灰岩 ・玄武岩 ・高炉スラグ	55	・20±3℃ 水中	91	300 600
IV. 加熱前養生条件の違いによる影響	フライアッシュB種	・硬質砂岩(1)	55	・20±3℃ 水中 ・20±3℃ 封かん ・20±3℃ 60±5%RH 気中	91	(300) 600
V. 加熱開始材令の違いによる影響	フライアッシュB種	・硬質砂岩(1) ・硬質砂岩(2) ・石灰岩 ・玄武岩 ・高炉スラグ	55	・20±3℃ 水中	28 91	(300) 600

[注] ( )内の要因については部分的に実験を実施

表-2 各検討項目の要因の組み合わせ

項目	仕様
(1) 最高温度	850℃
(2) 常用温度	600℃
(3) 内法	有効寸法 幅800×高800×奥行1,000mm
(4) 電源電圧	3Φ 200V 50HZ
(5) 制御	プログラム PID連続制御
(6) 攪拌機	1.5kw SUS-31DS 耐熱ファン
(7) 温度分布	有効内法にて ±10deg以内

表-3 マッフル炉の仕様

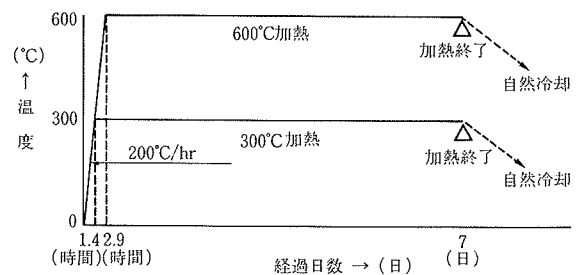


図-4 加熱パターン

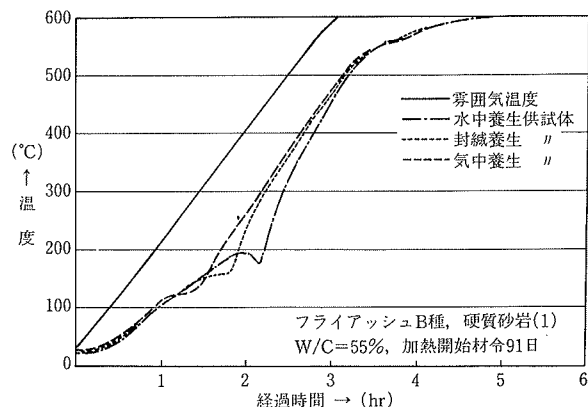


図-5 供試体の温度変化

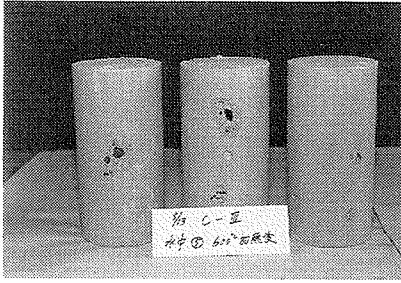


写真-1 ポップアウト現象



写真-2 剝離現象



写真-3 爆裂現象

的傾向として300°C, 600°C加熱とも実験条件によって残存比には差が認められるが, 600°Cではその差が300°Cより小となっている。

結果の傾向を読み取ると以下のとおりとなる。

- 加熱温度の圧縮強度残存比に及ぼす影響は大きく, 300°Cで50~120%, 600°Cで0~50%程度まで変化する。
- セメントの影響は, W/C, 加熱開始材令によって前述の爆裂の頻度に差が生ずるが, 残存比は W/C=55%, 600°C加熱で比較するとアルミナセメントの低下が大きかった他は大差がない。アルミナセメントの低下が著しかったのは, 熱劣化のほか, 転移によるものと考えられる。
- 骨材の影響は, 加熱開始材令28, 91日および300°C, 600°C加熱の場合ともその残存比は耐熱レンガが最も大きく, 石灰岩, 高炉スラグが小さい。
- W/Cが小なるに従い, 残存比が小となる傾向がある(600°C加熱のみ)。
- 加熱開始材令が増大するほど残存比が小となる。
- 加熱前養生条件の残存比に及ぼす影響は, ほとんど認められない。

これらのことから, コンクリートが高強度になるほどまた, 長期材令になるほど加熱後の残存比は小になるといえよう。また, アルミナセメントを除いて, 普通ポルトランドセメントと混合セメントの残存比の差はあまり無いものと思われる。

(3) 静弾性係数

加熱温度と静弾性係数残存比との関係を各影響要因ごと一括して図-7に示した。これより全般的傾向は圧縮強度の場合と同様であるが, 以下の傾向が認められる。

- 弾性係数の温度による劣化は圧縮強度より著しく, 300°Cで30~80%, 600°Cで0~15%程度の残存比となり, 低下は圧縮強度より著しい。
- セメント, 骨材の影響は, 300°C加熱では認められるが, 600°Cでは顕著な差はない。

検討項目	細目	爆裂の頻度(%)	実験条件
(1) セメントの種類	普通ポルトランド	45.8	・硬質砂岩(1)
	フライアッシュB種	24.0	・W/C=45~65%
	中庸熱ポルトランド	38.9	・28日, 91日加熱
	高炉セメントB種	0.0	・600°C
	アルミナセメント	58.3	・水中, 封緘, 気中養生
(2) 骨材の種類	硬質砂岩(1)	19.0	・フライアッシュB種
	硬質砂岩(2)	0	・W/C=55%
	石灰岩	5.6	・28日, 91日加熱
	高炉スラグ	11.1	・600°C
	玄武岩	0.0	・水中, 封緘, 気中養生
	耐火レンガ	0.0	
(3) W/C	45(%)	53.3	・硬質砂岩(1)
	55(%)	25.3	・各種セメント
	65(%)	23.3	・28日, 91日加熱
(4) 加熱開始材令	28(日)	11.1	・600°C
	91(日)	20.3	・水中, 封緘, 気中養生
			・各種骨材
			・各種セメント
(5) 加熱前養生条件	水中養生	36.9	・W/C=45~65%
	封緘養生	1.2	・600°C
	気中養生	13.8	・28日, 91日加熱
			・600°C
			・W/C=45~65%

表-4 供試体の爆裂の頻度

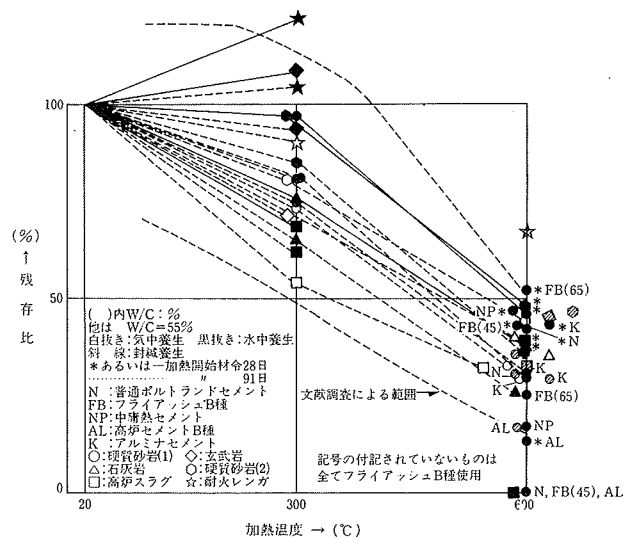


図-6 加熱温度と圧縮強度残存比

- W/Cの影響は圧縮強度の場合ほど顕著ではない。
- 加熱前養生条件の影響はほとんど認められない。
- 加熱開始材令の影響は顕著でない。

(4) 割裂強度

加熱温度と割裂強度残存比との関係を各影響要因ごとに一括して図-8に示した。これより300°C加熱では実験条件による差が大きく、アルミナセメントを用いた場合の残存比が小さいが、600°C加熱では各影響要因間の差は300°Cの場合より小となり、0~30%の残存比となっている。また、骨材種別では硬質砂岩、耐熱レンガを用いたものの残存比が大きく、高炉スラグを用いたものが小であった(300°Cのみ)。さらにW/Cの影響は顕著ではない。

なお、今回の実験結果は前述の文献調査結果の範囲に納まっており、概ね類似の傾向を示すことがわかった。

(5) 重量変化

加熱温度と重量減少率との関係を図-9に示した。これより、骨材の種類、養生条件によって差があるが加熱開始材令による差はほとんどない。また、300°Cよりも600°C加熱時の重量減少がやや大きく、結晶水の逸散によると推察され、これが強度・弾性係数の低下に大きな影響を与えていると考えられる。

4. まとめ

この実験により、高温時の各種コンクリートの物性評価に有益な情報を得ることができた。

結果を要約すると以下のとおりとなる。

- (1) コンクリート物性は加熱温度により大きな影響を受け、特に静弾性係数の高温による劣化が顕著である。
- (2) 600°C加熱の残存比は、圧縮強度が0~50%、弾性係数が0~15%、割裂強度が0~30%程度となる。
- (3) 今回の実験結果は、文献調査の範囲に納まっておりコンクリートの仕様が変わっても類似の傾向を示す。
- (4) コンクリートの耐熱性は各物性の残存比のみでなく、爆裂などの変質も併せて評価する必要がある。

引用文献

非常に数多くの文献を引用したので記載を省略する。

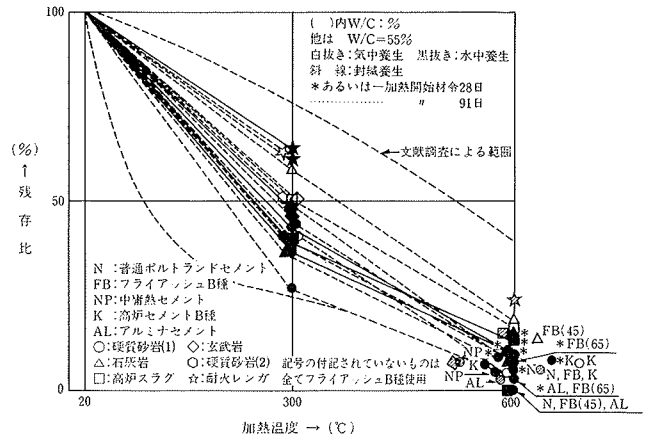


図-7 加熱温度と静弾性係数残存比

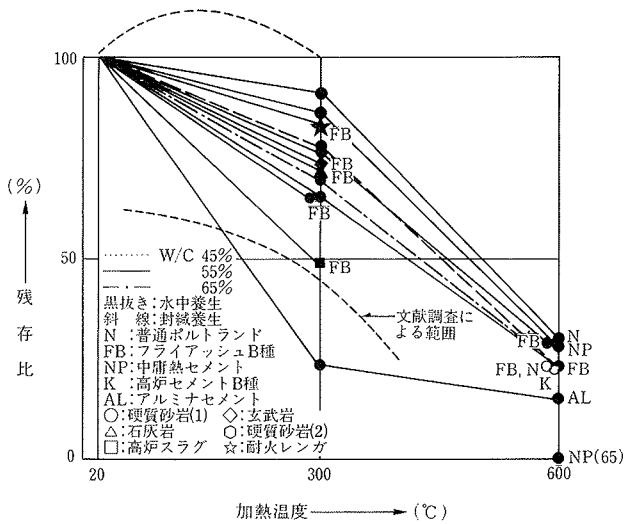


図-8 加熱温度と割裂強度残存比 (加熱開始材令91日)

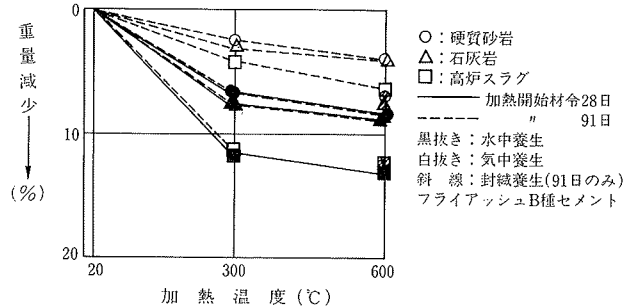


図-9 加熱温度と重量減少率