

論文 高温加熱下における高強度コンクリートの力学的性質に関する研究

一瀬賢一^{*1}・長尾覚博^{*2}・川口 徹^{*3}

要旨: 高温加熱下 (100 ~ 500℃) における高強度コンクリート (W/C=30%) の力学的性質 (圧縮強度、ヤング係数、応力ひずみ曲線) について、加熱温度、加熱速度、供試体寸法をパラメータとして実験的に検討し、以下のことを明らかにした。

(1) 熱間試験による圧縮強度は、100℃~200℃加熱では強度低下を生じ、300℃~400℃加熱では若干強度が回復し、400℃以上の加熱では低下する。(2) ヤング係数は、加熱温度が高いほど低下し、500℃加熱では常温時の40%まで低下する。(3) 圧縮強度およびヤング係数は、2.5℃/min. ~ 7.5℃/min. の加熱速度において差異を生じない。

キーワード: 高強度コンクリート, 熱間試験, 力学的性質, 加熱速度, 加熱温度

1. はじめに

近年、設計基準強度 (以下 F_c とする) 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 (以下RC造)、鋼管コンクリート柱 (以下CFT柱) 構造が、実用化されてきており、その耐火性能の解明が注目を浴びている。しかし、実大部材レベルでの実験は、設備面、コスト面などから様々なケースについて実験することは困難であるため、解析的研究が主流となりつつある。このため、高温を受けたコンクリートの力学的性質を把握することは、解析の精度を向上させる上で極めて重要である。高温下におけるコンクリートの力学的性質の内、普通強度のコンクリートについては過去に多くの実験および研究が行われてきている。しかし、加熱後の荷重試験 (冷間試験) に偏っており、加熱中の荷重試験 (熱間試験) のデータは少ない。また高強度コンクリートについては、2~3の報告がされているにすぎない。^{1)~3)}

本研究はこのような背景から、高温加熱下 (100 ~ 500℃) における高強度コンクリートの力学的性質 (圧縮強度、ヤング係数、応力ひずみ曲線) について、加熱温度、加熱速度、供試

体寸法をパラメータとして、実験的に検討・考察したものである。

2. 実験概要

2.1 実験の組合せ

実験条件は、表-1に示すように加熱速度3水準 (2.5℃/min., 5.0℃/min., 7.5℃/min.), 加熱温度6水準 (常温20℃, 100℃, 200℃, 300℃, 400℃, 500℃), 供試体寸法2水準 (A供試体: $\phi 75 \times 150$ mm, B供試体: $\phi 100 \times 200$ mm) とした。1実験条件あたりの供試体数は、常温時3本、加熱時においては、加熱速度2.5℃/min. の場合2本、加熱速度5.0℃/min. および7.5℃/min. の場合1本とした。

表-1 実験条件

項目	摘要	水準数
加熱温度	20℃ (常温), 100℃, 200℃, 300℃, 400℃, 500℃	6
加熱速度	2.5℃/min., 5.0℃/min., 7.5℃/min.	3
供試体の寸法	$\phi 75 \times 150$ mm (A), $\phi 100 \times 200$ mm (B)	2

*1 (株)大林組技術研究所 建築第二研究室主任研究員 工修 (正会員)

*2 同化学研究室主任研究員 工博 (正会員) *3 同建築第二研究室室長 工博 (正会員)

2.2 使用材料および調合

使用材料は、セメント(C)として普通ポルトランドセメント、細骨材(S)として木更津産山砂、粗骨材(G)として青梅産碎石(硬質砂岩)を使用した。骨材の品質を表-2に示す。なお、高温加熱を受けるコンクリートの力学的性質の変化は、骨材の影響を無視できないが、今回の実験では、一般のコンクリート用の骨材を使用した。また混和剤は、ポリカルボン酸系高性能AE減水剤(SP)を使用した。

コンクリートの調合条件は、水セメント比30%、単位水量 170kg/m^3 とした。またコンクリートのフレッシュ性状は、目標スランプフロー値 $60 \pm 10\text{cm}$ 、目標空気量 $2.0 \pm 1.0\%$ とした。コンクリートの調合を表-3に示す。

2.3 供試体の製作および養生方法

コンクリートは、容量 100l のパン型強制練りミキサで練混ぜ、供試体を製作した。打設後の供試体は、 20°C 、 $80\%RH$ の恒温恒湿室で養生し、翌日封かん後、実験時(材齢9ヶ月~1年)まで $20 \pm 3^\circ\text{C}$ 、 $60 \pm 5\%RH$ の恒温恒湿室で養生した。

2.4 加熱载荷試験機

加熱および载荷は、図-1および写真-1に示す試験機を使用した。加熱部分である電気炉の仕様を表-4に示す。加熱温度の調整は、供試体の表面温度が目標の加熱温度となるように電気炉の設定温度を調節することとし、図-2、3に示すように事前にキャリブレーションを行い、目標の加熱温度に対応する電気炉の設定温度および加熱時間を求めた。この結果、加熱温度の調整は、表-5に示すように電気炉の設定温度を目標の加熱温度よりも約 $50 \sim 130^\circ\text{C}$ 高くすることにより対応できることを確認できた。また加熱時間は、A供試体とB供試体においてほとんど差がなく、供試体表層部と中心部の温度差も電気炉の設定温度が最高温度に到達後、1.5時間以内で 5°C 未満となった。载荷は、加熱開始から供試体の表面温度と中心温度との差が 5°C 未満となる約4~7時間後に行った。

表-2 骨材の品質

記号	骨材の種類	表乾比重	粗粒率	吸水率 (%)
S	木更津産山砂	2.60	2.46	1.67
G	青梅産碎石	2.65	6.66	0.70

表-3 コンクリートの調合

W/C (%)	S/a (%)	単位量 (kg/m^3)				
		W	C	S	G	SP
30	45	170	567	720	906	$C \times 1.5\%$

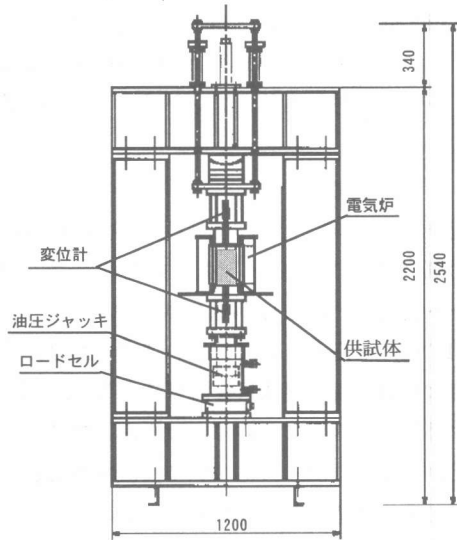


図-1 加熱载荷試験機

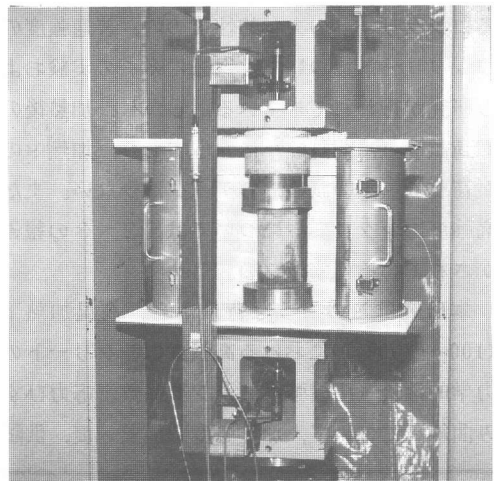


写真-1 加熱部

表-4 電気炉の仕様

項目	摘要
電源	単相 200V・2.5KW
外寸	φ300×300mm
内寸	φ140×300mm
発熱部	中央 200mm
最高温度	700℃

表-5 目標加熱温度に対する電気炉設定温度

加熱温度(℃)	加熱速度 2.5~7.5℃/min.	
	設定温度(℃)	加熱時間(hr)
20	0	0
100	150	4
200	280	5
300	400	5
400	520	5
500	630	6

2.5 測定項目・測定方法

主な測定項目は、熱間圧縮強度、ヤング係数、応力-ひずみ曲線である。各測定は、JISおよび土木学会規準等に準じた。実験は、材齢9ヶ月から1年で実施した。荷重は、許容2000KNのロードセルを介して測定した。ヤング係数およびひずみは、供試体の上下の載荷板上、石英ガラス管を介し高感度型変位計により変位を測定の上算定した。なお石英ガラス管は、管内を断熱し、熱が変位計に伝わらないようにした。

2.6 コンクリートの性状

使用したコンクリートのフレッシュ性状および加熱実験開始時における圧縮強度を表-6に示す。フレッシュ性状は、目標としたスランブフロー、空気量を有するコンクリートを得ることができた。またA供試体とB供試体の加熱実験開始時における圧縮強度(2000KN耐圧試験機の結果)は、概ね一致した。また加熱载荷試験機による結果も概ね一致(図-4, 5参照)することを確認した。

3. 実験結果および考察

3.1 圧縮強度

加熱温度と圧縮強度の関係を図-4, 5に示す。また加熱温度と圧縮強度残存率(常温時の

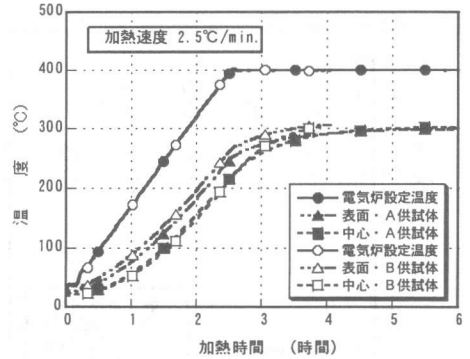


図-2 キャリブレーション

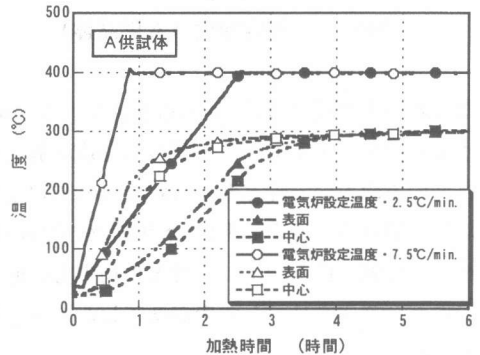


図-3 キャリブレーション

表-6 フレッシュ性状および実験開始前後の圧縮強度

スランブフロー (cm)	空気量 (%)	単位容積質量 (kg/m³)	コンクリート温度 (℃)	実験前圧縮強度 (N/mm²)	
				A供試体	B供試体
64×62	1.7	2434	23.0	88.1	91.5

圧縮強度に対する熱間圧縮強度の割合(%)の関係を図-6, 7に示す。熱間圧縮強度は、常温時に比べ100℃, 200℃加熱において強度低下が生じ、300℃加熱で100℃, 200℃に比べやや回復し、400℃以上の加熱では低下した。この結果は、文献1)の結果とほぼ同様の傾向を示している。100℃~200℃加熱における強度低下の原因は、コンクリート中の水分の移動によるゲル間の表面力の低下による⁵⁾説があるがまだ十分には解明されていない。また、300℃~400℃加

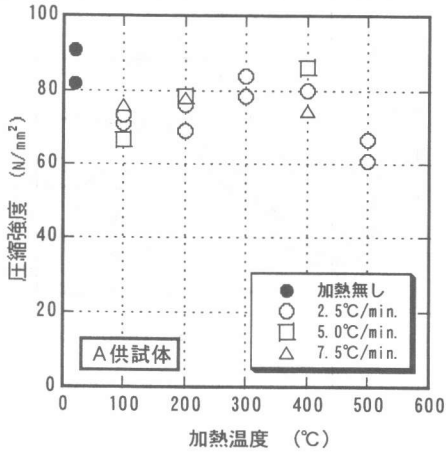


図-4 圧縮強度 (A供試体)

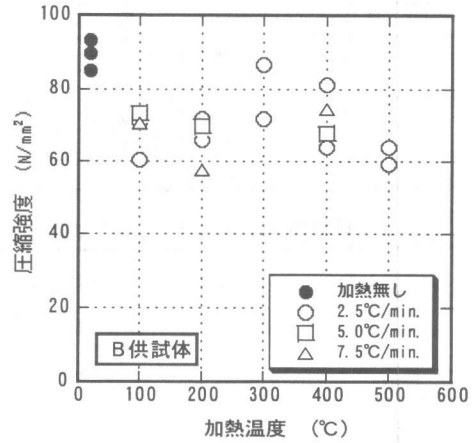


図-5 圧縮強度 (B供試体)

熱における強度回復は、未水和セメントの水和、水分の蒸発によるセメントゲルの強度上昇やゲル間の表面力の上昇と考えられる。400°C以上の加熱における強度の低下は、水和鉱物の脱水・乾燥による強度低下および骨材との拘束力の低下により、コンクリート強度が低下したものと推察する。

加熱速度の強度に及ぼす影響は、今回の実験の範囲ではA、B供試体とも特に差が認められなかった。これは、加熱速度2.5~7.5°C/min.の範囲では、供試体内の温度勾配に顕著な差がないことによるものと推察する。

供試体寸法の違いによる影響としては、100°C、200°C加熱における圧縮強度残存率がA供試体では76~89%、B供試体では64~82%とA供試体の方が若干大きくなった。また300°C以上の加熱における圧縮強度残存率は、A供試体の方が0~15%大きい値を示した。この結果から、加熱を受けた場合A供試体の圧縮強度残存率は、B供試体に比べ同程度または若干高い傾向を示すが、寸法効果を論じるには更にデータを積み重ねる必要があると考える。

筆者らが同一産地の骨材を使用し、同調合のコンクリートで以前実施した冷間試験(24時間加熱温度維持後自然冷却)の結果⁴⁾と比較すると、100°Cおよび200°C加熱では冷間試験の圧縮

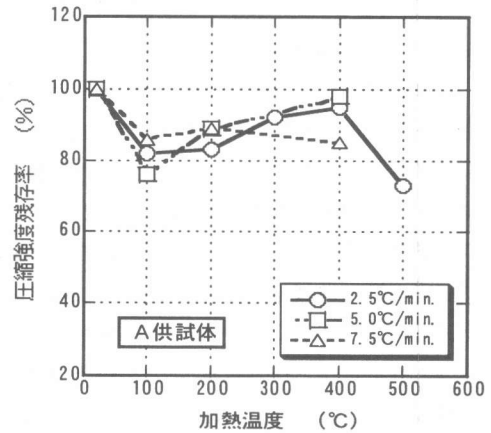


図-6 圧縮強度残存率 (A供試体)

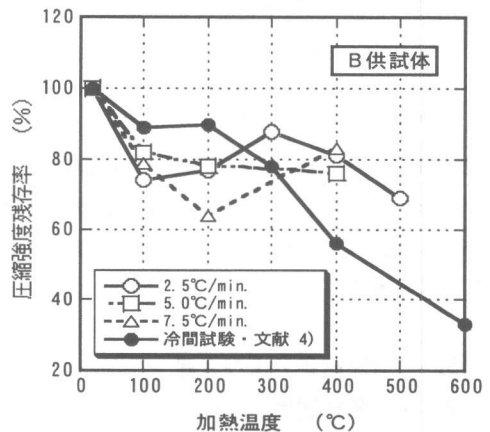


図-7 圧縮強度残存率 (B供試体)

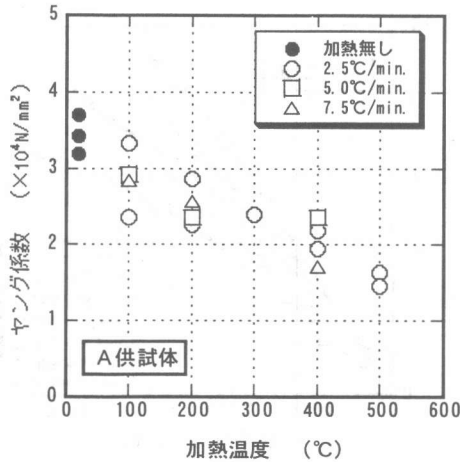


図-8 ヤング係数 (A供試体)

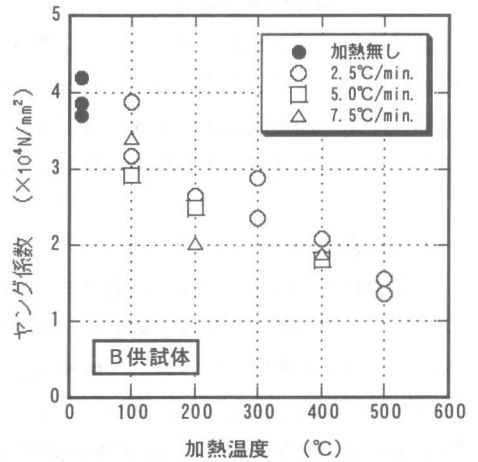


図-9 ヤング係数 (B供試体)

強度残存率が5~10%大きく、400℃以上の加熱では10~15%小さくなった。100℃および200℃加熱において冷間試験の圧縮強度残存率が熱間試験よりも大きい原因の1つとしては、加熱時間が熱間試験の4~7時間に比べ、24時間と長いいため、加熱による水和の促進が強度に寄与し、強度低下が小さくなったものと推察する。一方400℃以上の加熱において冷間試験の圧縮残存率率が小さい原因は、供試体の冷却時におけるひび割れの伸展が強度低下に影響したものと考えられる。

3.2 ヤング係数

加熱温度とヤング係数の関係を図-8, 9に示す。また加熱温度とヤング係数残存率(常温時のヤング係数に対する熱間試験時のヤング係数の割合:%)の関係を図-10, 11に示す。

ヤング係数は、圧縮強度とは異なり、加熱温度が高いほど低下し、500℃加熱では常温時の40%まで低下した。また加熱速度の影響は、圧縮強度同様認められなかった。

供試体寸法の違いは、100℃加熱においてA供試体のヤング係数がB供試体よりも小さくなっているが、200℃加熱以上については概ね同様の値を示しており、特に影響していないと推察する。ただし、100℃加熱におけるヤング係数の相違については、更に検討する必要がある。

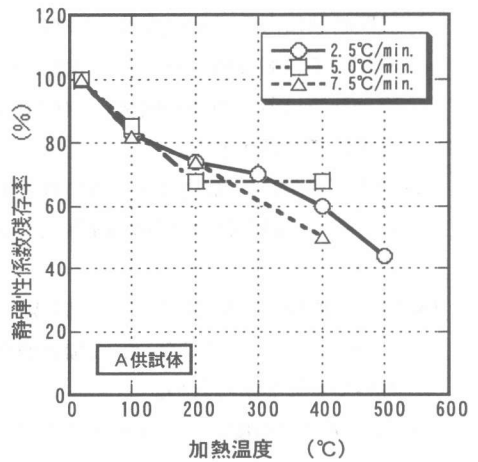


図-10 ヤング係数残存率 (A供試体)

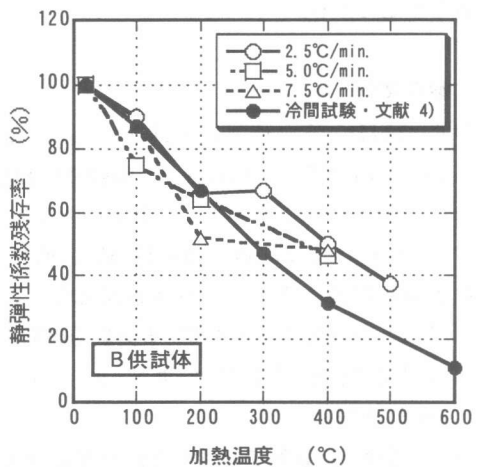


図-11 ヤング係数残存率 (B供試体)

3.3 応力ひずみ曲線

加熱速度2.5℃/min.における応力ひずみ曲線
の一例を図-12, 13に示す。供試体の種類
に関係なく、加熱温度が高くなるほど単位応力
に対するひずみは増大する結果となっている。

4. まとめ

高温加熱下(100~500℃)における高強度コ
ンクリートの力学的性質(圧縮強度, ヤング係
数, 応力ひずみ曲線)について, 加熱温度, 加
熱速度, 供試体寸法をパラメータとして, 実験
的に検討し, 既存資料の少ない熱間試験による
情報を得ることができた。実験結果をまとめる
と以下のことが言える。

- (1) 熱間試験による圧縮強度は, 100℃~200℃加熱では強度低下を生じ, 300℃~400℃加熱では若干強度が回復し, 400℃以上の加熱では低下する。
- (2) ヤング係数は, 加熱温度が高いほど低下し, 500℃加熱では常温時の40%まで低下する。
- (3) 圧縮強度およびヤング係数は, 2.5℃/min. ~7.5℃/min. の加熱速度において差異を生じない。

今後は, 更に高強度コンクリートの力学的性質や高強度コンクリート部材の耐火性評価に必要な熱変形状および水分移動形状等の検討を行う予定である。

参考文献

- 1) Castillo, C. et al. : Effect of Transient High Temperature on High-Strength Concrete, ACI Materials Journal, Vol. 87, No. 1, pp. 47-53, 1990
- 2) 安部武雄他: 高温度における高強度コンクリートの力学的性質に関する実験的研究, 日本建築学会学術講演梗概集A, pp. 1157-1158, 1991.9
- 3) 上田弘樹他: 鉄筋で補強した耐火被覆のないCFT柱の耐火性に関する研究 その1)実験計
- 4) 一瀬賢一他: 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, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 19, No. 1, pp. 535-540, 1997
- 5) Lankard, D. R. et al. : Effect of Moisture Content on the Structural Properties of Portland Cement Concrete Exposed to Temperatures up to 500F, Temperature and Concrete, SP-25, American Concrete Institute, pp. 59-102, 1971

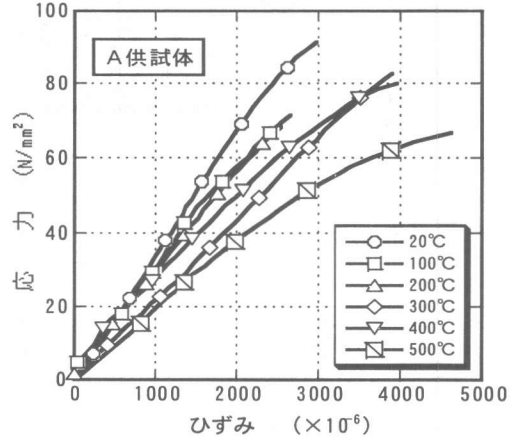


図-12 応力ひずみ曲線 (A供試体)

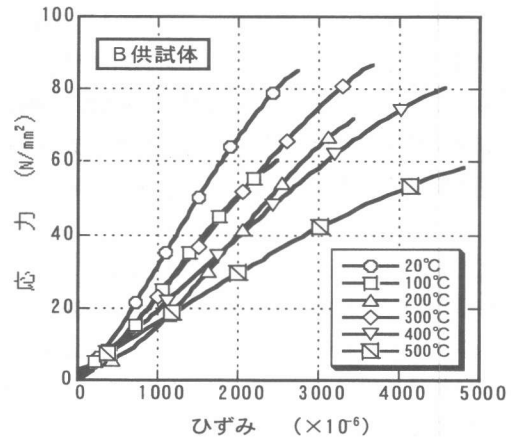


図-13 応力ひずみ曲線 (B供試体)