

論文 高温加熱を受けた $100\text{N}/\text{mm}^2$ 級高強度コンクリートの力学的性状

—瀬 賢—^{*1}

要旨：設計基準強度 (F_c) $100\text{N}/\text{mm}^2$ 級の高強度コンクリートの高温加熱直後とその後の養生の違いによる力学的性状について実験を行い、以下のことがわかった。

- (1) 高温加熱後の圧縮強度は、加熱温度 200 を超えると加熱温度に比例して直線的に強度低下する。
- (2) 高温加熱後のヤング係数は、加熱温度に比例して概ね直線的に低下する。
- (3) $F_c 100\text{N}/\text{mm}^2$ 級の高強度コンクリートでは、加熱後の水中養生により、圧縮強度、ヤング係数に若干の回復が認められるものの、普通コンクリート同様の回復は期待できない。
- (4) 高温加熱後の応力 - ひずみ関係は、加熱温度 200 以上になると S 字型を示す。

キーワード：高強度コンクリート、高温加熱、圧縮強度、ヤング係数、強度回復

1. はじめに

首都圏を中心に設計基準強度（以下 F_c ） $100\text{N}/\text{mm}^2$ 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）が多数施工されるようになってきた。高強度コンクリートは、組織が緻密なため、火災時にかぶり部分のコンクリートが爆裂しやすく、部材の耐力低下を生じる場合がある。このため設計基準強度が $60\text{N}/\text{mm}^2$ を超える高強度コンクリートについては、耐火実験や解析により火災時の健全性評価が必要とされている。また一旦火災が生じるとその再使用には、材料面・構造面からの劣化診断が必要となる。このため、高強度コンクリートの高温加熱後の力学的性状の把握が重要であり、この数年で研究・報告が多くなってきている^{1) - 3)}。しかし $F_c 100\text{N}/\text{mm}^2$ 以上の高強度コンクリートの研究報告^{4), 5)}はまだ少なく、今後データの蓄積が必要である。また高温加熱後の強度回復についても、普通コンクリートと同等のようには回復がほとんど期待できないという報告⁶⁾、水中養生によって加熱温度 500 以下であれば常温時の 80% の圧縮強度、 70% のヤング係数まで回復するという報告⁷⁾など様々であ

り、まだ結論づけられる段階に至っていない。

本研究では、 $F_c 100\text{N}/\text{mm}^2$ 級の高強度コンクリートの高温加熱後の力学特性状に着目し、高温加熱直後とその後の養生の違いによる力学的性状について実験的に検討、考察を加えた。

2. 実験概要

2.1 実験条件

実験条件は、表 - 1 に示す加熱温度 8 水準（ 20 を含む）、加熱後の養生 2 水準をパラメータとした。また加熱後の養生期間は、28日の 1 水準とした。

2.2 使用材料と調合

使用材料は、低熱ポルトランドセメントにシリカフュームをプレミックスしたセメント（密度 $3.08\text{g}/\text{cm}^3$ ）、細骨材に山砂、粗骨材として砕石（硬質砂岩）を使用した。粗骨材は、 $F_c 120\text{N}/\text{mm}^2$ 級まで十分適用できる骨材とした。骨材の品質を表 - 2 に示す。化学混和剤は、ポリカルボン酸系高分子化合物を主成分とする高性能減水剤を使用した。また爆裂防止のため有機繊維（ポリプロピレン繊維、融点：約 165 ）をコンクリート 1m^3 に対し 2kg 添加した。

*1 (株)大林組技術研究所 建築材料研究室 構造材料グループ長 博(工)(正会員)

調合は、 $F_c 100\text{N}/\text{mm}^2$ を確保できるものとし、水セメント比21%とした。目標スランブフロー値は60cm(許容値： $\pm 10\text{cm}$)、目標空気量は2.0%(許容値： $+1.0\%$ 、 -1.5%)とした。コンクリートの調合を表-3に示す。

2.3 測定項目と測定方法

測定項目は、フレッシュ性状(スランブフロー、空気量、単位容積質量、温度)、圧縮強度、動弾性係数、ヤング係数、質量変化および応力-ひずみ関係とした。各測定は、各JISに準じて実施した。供試体は $100 \times 200\text{mm}$ を用いた。供試体の本数は、各実験の組合せに対して3本とした。

2.4 コンクリートの打設と養生

コンクリートは、容量 3.25m^3 の強制攪拌2軸ミキサを使用し、 2.5m^3 混練した。有機繊維は、トラックアジテータ内で添加した。2分間強制攪拌した後、フレッシュ性状の測定と供試体の採取を行った。コンクリートのフレッシュ性状は、表-4に示すように目標のスランブフロー、空気量を満足した。供試体採取後は、すぐに封かん養生とし、温度 20 ± 3 の恒温室内で材齢91日まで養生した。また供試体は、実験前日に脱型し、翌日加熱を開始した。

2.5 加熱方法

加熱は、プログラム調節器付き電気炉を使用した。加熱は、材齢91~110日の間で実施した。加熱速度は、既往の加熱後載荷試験^{1),5),7)}と同様に 100 /hrとした。加熱パターンを図-1に示す。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24時間計画加熱温度を保持した。降温は、炉内ファンを作動させながら自然冷却とした。供試体は、炉内の雰囲気温度が 50 以下になるまで炉内に放置した。加熱後の各測定および試験は、降温開始から5~18時間後、常温下で行った。

2.6 加熱後の養生方法と養生期間

加熱後の供試体は、加熱直後の試験を行なう供試体(以下加熱直後供試体)を除いて、水中養生とした。水中養生期間は、文献7)の結果を

表 - 1 実験条件

項目	摘要	水準数
加熱温度	20 , 100 , 150 , 200 300 , 400 , 500 , 600	8
加熱後の養生	A 養生：水中(1日)+気中(27日) B 養生：水中(7日)+気中(21日)	2
加熱後の養生期間	28日	1

表 - 2 骨材の品質

記号	骨材の種類	表乾密度 (g/cm^3)	粗粒率	実積率
S	山砂	2.62	2.64	-
G	碎石	2.64	6.60	60.0

表 - 3 コンクリートの調合

W/C (%)	単位量 (kg/m^3)				混和剤 対セメント(%)
	W	C	S	G	
21	160	762	668	840	$C \times 1.35\%$

表 - 4 フレッシュ性状

スランブフロー ($\text{cm} \times \text{cm}$)	空気量 (%)	単位容積質量 (kg/m^3)	温度 ()
69.5×67.5	1.3	2449	23.0

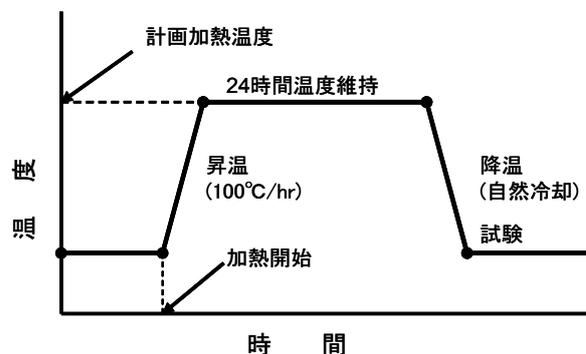


図 - 1 加熱パターン

参考として7日水中(以下B養生)とし、比較用に1日水中(以下A養生)も加えた。水中養生後は、加熱後から28日経過後まで気中養生(20 ± 3 , $60 \pm 5\% \text{R.H.}$)とした。

3. 実験結果および考察

3.1 加熱直後の力学的性質

加熱温度と圧縮強度および圧縮強度残存比(常温時の強度に対する各実験条件における圧縮強度の比)の関係を図-2,3に示す。なお圧縮強度残存比については、文献3)の提案式

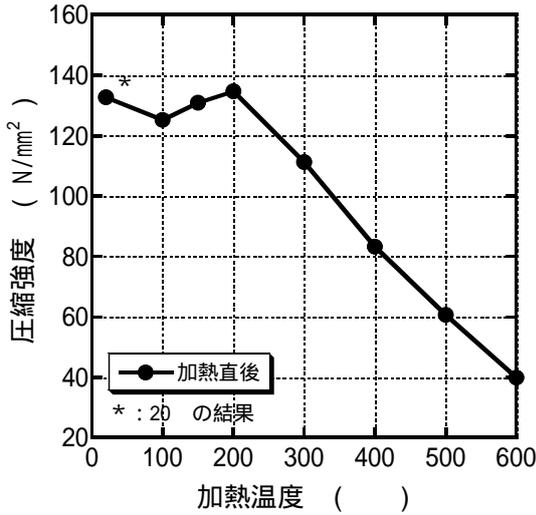


図 - 2 加熱温度と圧縮強度

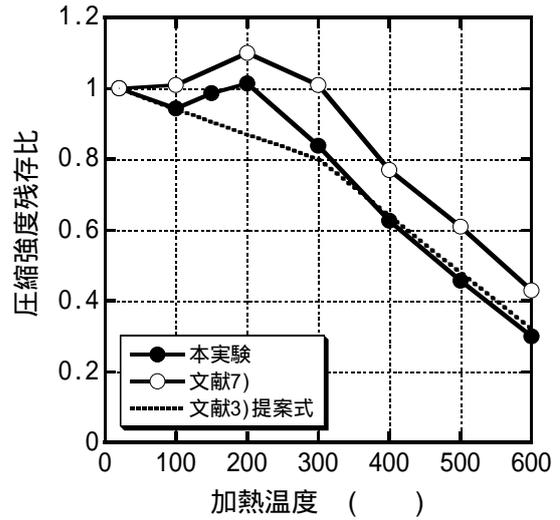


図 - 3 加熱温度と圧縮強度残存比

および文献7)の結果(水セメント比30%)も併せて示した。図 - 2の結果から、加熱温度200までは常温時と同程度または若干低い強度を示し、200を超えると加熱温度に比例して直線的に強度低下を示した。圧縮強度残存比は、 $F_c60\text{N/mm}^2$ 級の文献7)の結果と比較すると、加熱による強度低下が大きく5~20%低い結果を示した。また文献3)の提案値と比較すると、加熱温度150、200では本実験の値が大きいものの、加熱温度300以上では概ね一致した。また加熱温度600でも常温時の30%の圧縮強度を残存した。

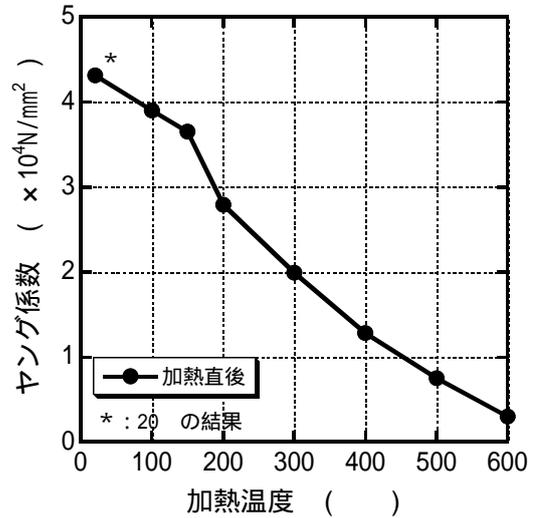


図 - 4 加熱温度とヤング係数

加熱温度とヤング係数およびヤング係数残存比(常温時のヤング係数に対する各実験条件におけるヤング係数の比)の関係を図 - 4, 5に示す。なおヤング係数残存比については、圧縮強度残存比と同様に文献3)の提案式および文献7)の結果も併せて示した。図 - 4の結果から、ヤング係数は、加熱温度に比例して概ね直線的に低下した。またヤング係数残存比は、文献3)の提案式および文献7)の結果と同様の値を示し、加熱温度600で常温時の10%まで低下した。

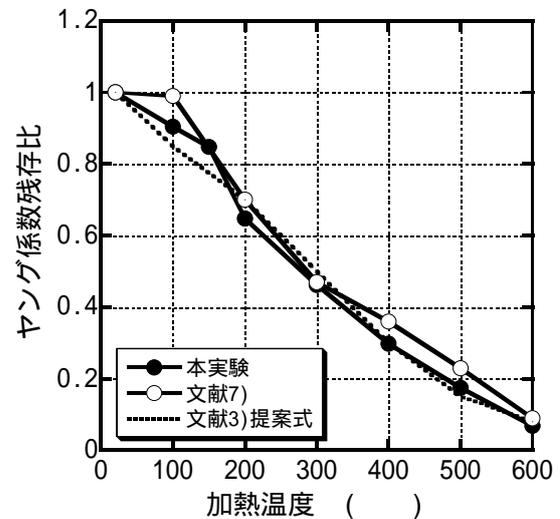


図 - 5 加熱温度とヤング係数

3.2 圧縮強度と養生

加熱温度と養生別圧縮強度残存比の関係を図 - 6に示す。加熱直後と水中養生した供試体

の圧縮強度残存比を比較すると、加熱温度 200 ~ 400 までは、加熱直後の値が大きく、加熱温度 500 , 600 では水中養生の値が 0.02 ~ 0.13 大きく、強度回復が認められる。また A 養生と B 養生を比較すると、加熱温度 300 以上では、水中養生期間の長い B 養生の方が 0.04 ~ 0.07 大きな圧縮強度残存比を示した。圧縮強度の回復は、加熱後の水中養生により若干認められるが、普通コンクリートや文献7) で示すように、加熱温度 500 において常温時の 80% までの回復は認められなかった。

3.3 ヤング係数と養生

加熱温度と養生別ヤング係数残存比の関係を図 - 7 に示す。加熱直後と水中養生した供試体のヤング係数残存比を比較すると、各加熱温度において加熱直後に比べ水中養生した供試体のヤング係数残存比が 0.04 ~ 0.17 程度大きく、回復が認められる。また A 養生と B 養生を比較すると、加熱温度 300 以上では、圧縮強度残存比と同様に、水中養生期間の長い B 養生の方が 0.04 ~ 0.12 大きなヤング係数残存比を示した。ヤング係数の回復には、吸水量が大きく影響していることが推察できる。しかし、ヤング係数の回復は、加熱温度 300 でもヤング係数残存比として約 0.6 であり、文献7) のような常温時の 70% までの回復までは認められなかった。

3.4 動弾性係数

ヤング係数と動弾性係数の関係を図 - 8 に示す。加熱直後の供試体におけるヤング係数と動弾性係数の関係は、既往の結果¹⁾と同様に相関関係が認められた。しかし、加熱後水中養生した供試体は、ヤング係数が小さい供試体(加熱温度が高い供試体)ほど動弾性係数との差が大きくなった。これは、加熱後の吸水により、供試体の含水率が大きくなり、見かけ上動弾性係数が大きくなったものと推察される。

3.5 質量変化率

加熱温度と質量変化率(高温加熱前の質量に対する強度試験時の質量減少を百分率で示した

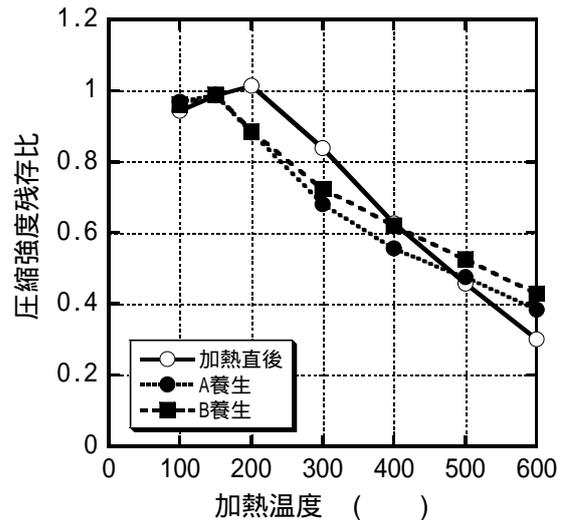


図 - 6 加熱温度と養生別圧縮強度残存比

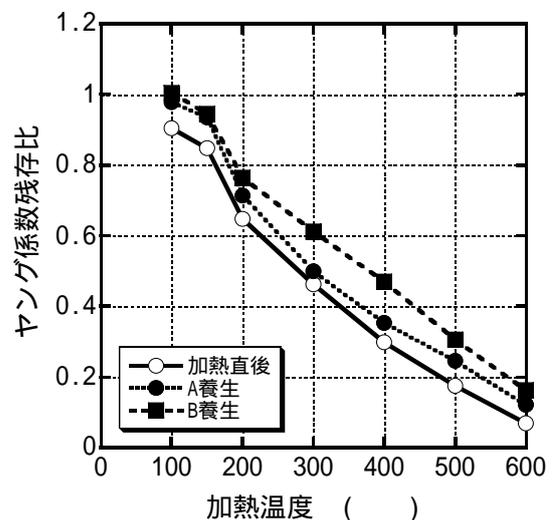


図 - 7 加熱温度と養生別ヤング係数残存比

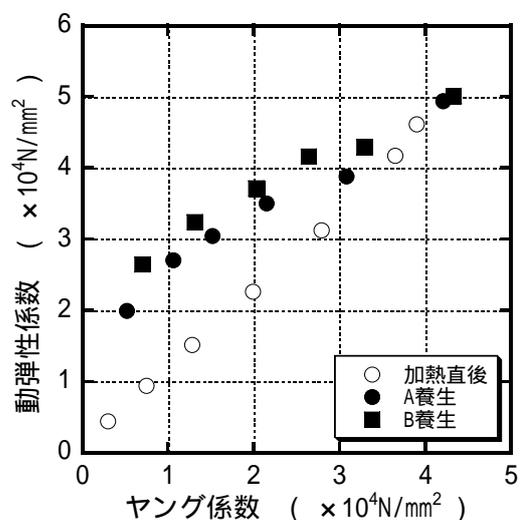


図 - 8 ヤング係数と動弾性係数

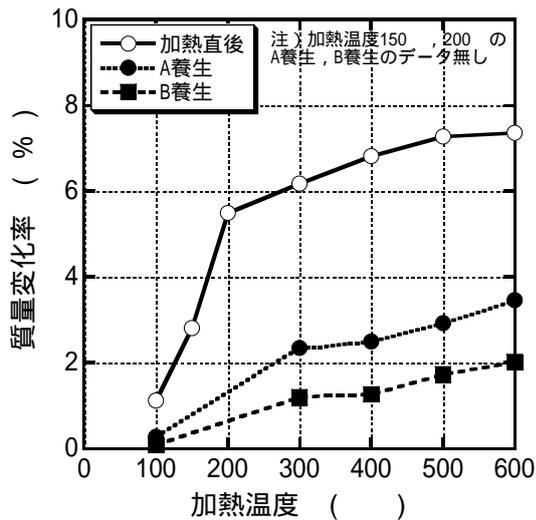


図 - 9 質量変化率

もの)の関係を図 - 9 に示す。この結果から加熱温度300 以上では、約6 ~ 7.5%の質量変化が生じているが、水中養生によりA養生では約4%、またB養生では約5%の水分が吸収されていることがわかる。これは、加熱により生じたひび割れが吸水を容易にさせ、またCaO からCa(OH)₂への発熱反応に使用されたものと推察できる。

3.6 応力 - ひずみ関係

加熱後の養生別応力 - ひずみ関係を図 - 10 ~ 図 - 12 (図中のプロットは、測定値の代表値を示す。以下同様) に示す。加熱温度200 以上では、加熱直後、A養生およびB養生供試体共に加熱温度が高くなるほど応力 - ひずみ関係の勾配が緩やかになり、最大ひずみが大きくなった。また加熱直後の供試体は、加熱温度200 以上になるとS字型の応力 - ひずみ関係を示した。これは、熱応力によって試験体内部に発生している微細ひび割れが影響しているものと考えられる。

加熱温度別の応力 - ひずみ関係の一例を図 - 13 ~ 15 に示す。図に示すように加熱温度200 以上になると加熱直後の応力 - ひずみ関係の勾配が緩くなり、S字型になることが認められる。更に加熱温度400 , 600 となるとどの養生でも応力 - ひずみ関係の勾配は緩くな

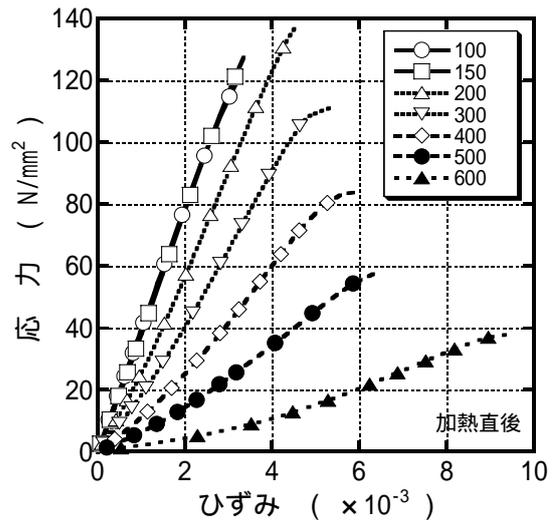


図 - 10 応力 - ひずみ曲線 (加熱直後)

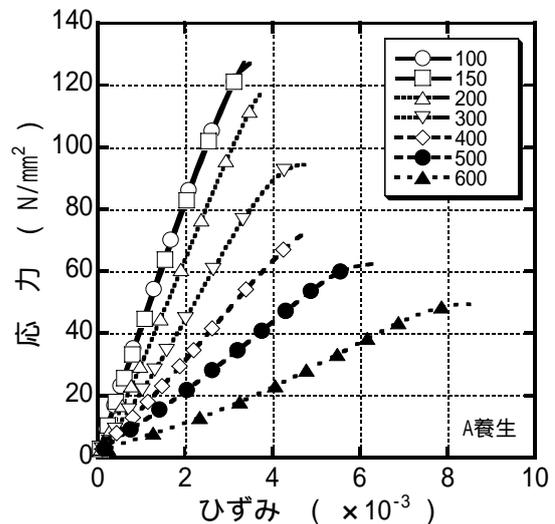


図 - 11 応力 - ひずみ曲線 (A 養生)

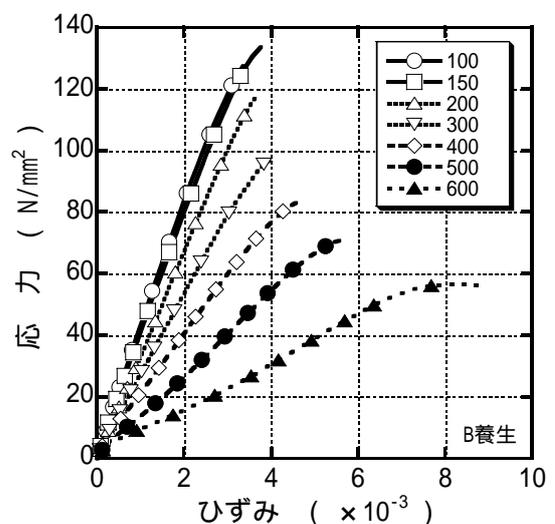


図 - 12 応力 - ひずみ曲線 (B 養生)

るが、加熱直後 < A養生 < B養生と勾配の違い顯著になってくる。

4. まとめ

Fc100N/mm² 級の高強度コンクリートの高温加熱後の力学的性状に着目し、高温加熱直後とその後の養生の違いによる力学的性状について実験を行い、以下のことがわかった。

- (1) 高温加熱後の圧縮強度は、加熱温度 200 を超えると加熱温度に比例して直線的に強度低下する。また圧縮強度の回復は、加熱温度 500 以上において若干認められる。
- (2) 高温加熱後のヤング係数は、加熱温度に比例して概ね直線的に低下する。またヤング係数の回復は、加熱後水中養生により、4 ~ 17% 程度認められる。
- (3) Fc100N/mm² 級の高強度コンクリートでは、普通コンクリート同様の強度回復は期待できない。
- (4) 高温加熱後の応力 - ひずみ関係は、加熱温度 200 以上になると S 字型を示す。

参考文献

- 1) 一瀬賢一ほか：高温加熱を受けた高強度コンクリートの力学的に関する実験的研究，日本建築学会構造系論文集，第 541 号，pp.23-30，2001.3
- 2) 安部武雄ほか：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
- 3) 日本建築学会編：構造材料のガイドブック，2004.
- 4) 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.
- 5) 一瀬賢一ほか：高温加熱を受けた超高強度コンクリートの力学的性質，日本建築学会大会学術梗概集，A-1，pp.403-404，2005.9

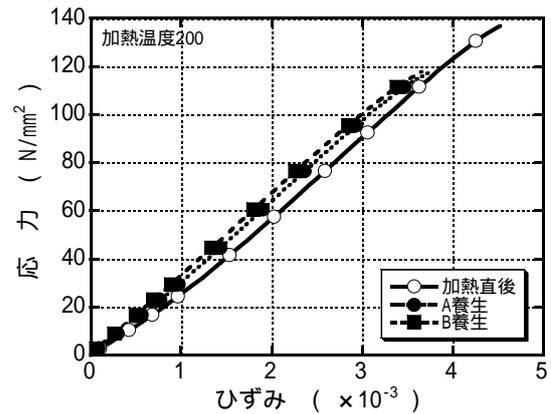


図 - 1 3 応力 - ひずみ曲線 (200)

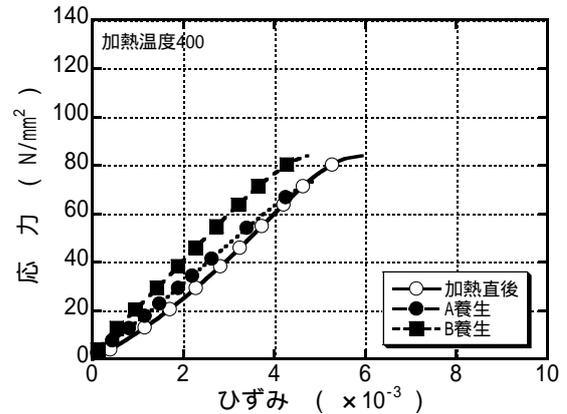


図 - 1 4 応力 - ひずみ曲線 (400)

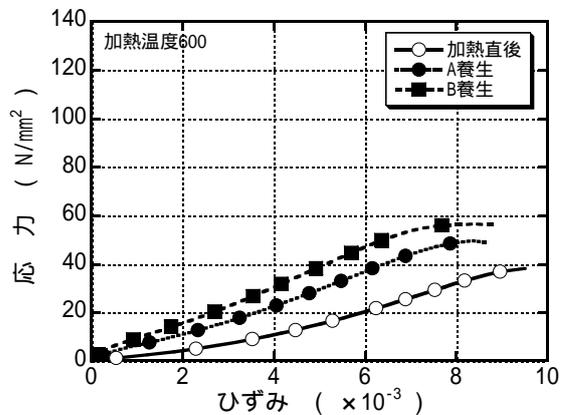


図 - 1 5 応力 - ひずみ曲線 (600)

- 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) 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.