

高温加熱後の超高強度材料の力学的性質

松戸 正士 西田 浩和
片寄 哲務

概 要

本報告は、火災加熱を受けた後の超高強度材料(コンクリートおよび鉄筋)の力学的性質を確認することを目的として実施した素材実験の結果をまとめたものである。以下に、実験から得られた結果を示す。

コンクリートに関しては、1) 圧縮強度およびヤング係数は、加熱温度の上昇に伴い大きく低下する。2) 圧縮強度は、普通強度コンクリートほどは期待できないが、300℃以下の加熱であれば常温時の 8割程度まで回復する。3) 加熱後に水中養生することにより圧縮強度およびヤング係数の回復が期待できる。鉄筋に関しては、1) USD685 では 600℃、SBPD1275 では 300℃を超えると降伏強度および引張強度が直線的に低下する。2) 弾性係数は、常温まで冷却することによりほぼ常温時の値まで回復する。

Mechanical Properties of Ultra-High Strength Materials after High Temperature Heating

Abstract

This paper describes experiments on the mechanical properties of ultra-high strength concrete and reinforced bar exposed to high temperature heating. The following conclusions were obtained:

(Properties of concrete)

- 1) Compressive strength and Young's modulus decreased with a rise in heating temperature.
- 2) If heating temperature is less than 300℃, the compressive strength returns to 80% of its pre-heating on cooling to room temperature.
- 3) The decreased compressive strength and Young's modulus restored if underwater curing was given after heating.

(Properties for reinforced bar)

- 1) The Yield strength and tensile strength started to decrease linearly at the temperature of over 600℃ for USD685 and 300℃ for SBPD1275.
- 2) The decreased Elastic-modulus restored to the value at the normal temperature if cooling was given after heating.

キーワード: 高強度コンクリート, 高強度鉄筋,
高温加熱後, 力学的性質, 強度回復

§1. はじめに

建築基準法では、コンクリートは不燃材料と定められており、また鉄筋コンクリート構造は耐火構造と定められていることから、コンクリート及び鉄筋コンクリート構造に対する火災時の研究は鉄骨構造と比較して少ない。さらに、火災後の研究に関しても、鉄筋及びコンクリートが火災後に強度回復するという既往の研究のあることからさらに少ない^(例えば 1)。

しかしながら、近年の建築物の高層化に伴い、その構造部材に用いる材料強度が上昇する傾向にあり、最近の研究によると、高強度材料は火災加熱を受けた後、材料が常温に戻っても強度回復があまり期待できないという報告が見られるようになってきた^(例えば 2,3)。

本研究では、設計基準強度 120N/mm²級の高強度コンクリートを用いる建築物の火災を受けた後の性能を把握するための第 1 ステップとして、超高強度材料(コンクリート及び鉄筋)の、火災加熱を受けた後の力学的性質を確認することを目的とした。

§2. 実験計画

2.1 実験条件

コンクリートおよび鉄筋の実験条件を表 1, 2 にそれぞれ示す。尚、表中の○は試験体の本数を示す。

コンクリートの実験条件は、加熱温度、試験体形状、加熱後の養生期間、加熱後の養生方法とした。

加熱温度は、常温(非加熱)を含めて、100 , 200 , 300 , 400 , 500 , 600 , 700 および 800 の 9 水準、供試体形状は、φ10×20cm および φ7.5×15cm の 2 水準、加熱後の養生期間は、加熱直後、28 日(1 ヶ月)、91 日(3 ヶ月)、182 日(6 ヶ月)、および 365 日(1 年)の 5 水準、加熱後の養生方法は、気中(20 : 60%RH)および水中(標準養生)の 2 水準である。

鉄筋の実験条件は、加熱温度および鋼種とし、加熱温度は、常温(非加熱)を含めて、100 , 200 , 300 , 400 , 500 , 600 , 700 および 800 の 9 水準、鋼種は、USD685 および SBPD1275 の 2 水準とした。

表 1 コンクリートの実験条件

試験体形状	加熱後の養生期間	加熱後の養生方法	加熱温度()								
			常温	100	200	300	400	500	600	700	800
φ10 × 20cm	直後	-	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○
				○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○
	28 日	気中	-	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○
		水中	-	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○
	91 日	気中	-	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○
		水中	-	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○
	182 日	気中	-	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○
		水中	-	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○
	365 日	気中	-	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○
		水中	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○
φ7.5 × 15cm	直後	-	○ ○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○
				○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○
	28 日	気中	-	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○
		水中	-	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○
	91 日	気中	-	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○
		水中	-	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○
	182 日	気中	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		水中	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	365 日	気中	-	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○
		水中	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○

表 2 鉄筋の実験条件

鋼種	加熱温度()								
	常温	100	200	300	400	500	600	700	800
USD685	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○
SBPD1275	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○

2.2 試験体

コンクリートの試験体は、 $\phi 10 \times 20\text{cm}$ および $\phi 7.5 \times 15\text{cm}$ の 2 種類とし、JIS A 1132(コンクリートの強度試験用供試体の作り方)に準拠して製作した。型枠は、プラスチック製型枠を用いた。各試験体は、コンクリート打設後約 48 時間(打設の翌々日)で脱型し、高温加熱を与える材齢 6 ヶ月まで標準水中養生とした。これは、一連の実験が長期にわたるため、材齢の違いによる試験体間の強度差が出来るだけ少なくなるように考慮して 6 ヶ月の長期材齢で高温加熱実験を実施することにしたためである。コンクリートの使用材料および割合を、それぞれ表 3、4 に示す。

試験体打設時のフレッシュ性状としては、スランプフローを 65cm(許容差 $\pm 7.5\text{cm}$)、空気量を 2%(許容差 $\pm 1\%$)を目標とした。試験体打設時のフレッシュ性状を表 5 に示す。

鉄筋の試験体は、USD865 を D19, SBPD1275 を U9.0 の径の鉄筋から長さ 600mm に切り出したものをそれぞれ用いた。

2.3 加熱試験方法

加熱は、プログラム調整機能を有した電気炉によった。加熱スケジュールは、昇温速度を 1 /分、100 毎の停滞時間を 100 および 200 で 3 時間、300 および 400 で 2 時間、500 以上で 1 時間とし、目標温度に到達してからは、上記プラス 1 時間停滞させることとした。加熱スケジュールの一例(300 の場合)を図 1 に示す。

試験体の配置を図 2 に示す。 $\phi 10 \times 20\text{cm}$ の試験体は、各温度で 30 本以上必要となるため、2 度に分けて加熱した。 $\phi 7.5 \times 15\text{cm}$ の試験体は、各温度で 19 本を一度に加熱した。尚、加熱スケジュールおよび試験体の配置は、試験体内外および試験体間の温度差が出来るだけ少なくなるよう、事前に実施した予備実験から決定した。

鉄筋の加熱スケジュールは、昇温速度を 10 /分で目標温度まで加熱し、目標温度到達後 1 時間保持してから自然冷却とした。

2.4 強度試験方法

コンクリートの圧縮強度試験は、JIS A 1108 に準じて実施した。測定項目は、圧縮強度、ヤング係数(強度の 1/3 応力時セカントモデュラス)、圧縮強度時のひずみ、圧縮強度試験時の試験体寸法および質量とした。試験体のひずみはコンプレッソメーターにより測定した。

加熱直後の圧縮試験は、加熱試験後自然冷却し、試験体の温度が 30 程度に低下するのを待って実施した。尚、 $\phi 10 \times 20\text{cm}$ の試験体は 2 回に分けて加熱しているため、それぞれの加熱において加熱直後の圧縮試験を実施した。

鉄筋の引張強度試験は、JIS Z 2241 に準じて実施した。測定項目は、降伏強度、引張強度、弾性係数および伸びとした。試験体のひずみは、試験体の両面に貼りつけた塑性ゲージにより測定した。

表 3 コンクリートの使用材料

セメント (C)	低熱ポルトランドセメント (密度 3.22g/cm^3 , $B=C+SF$)
細骨材 (S1)	市原産山砂 (表乾密度 2.57g/cm^3 , 吸水率 3.02%)
細骨材 (S2)	相模川水系陸砂 (表乾密度 2.60g/cm^3 , 吸水率 2.96%)
粗骨材 (G)	青梅産砕石 硬質砂岩 (表乾密度 2.65g/cm^3 , 吸水率 0.63%)
混和材 (SF)	粉体シリカフューム (密度 2.20g/cm^3)
混和剤	高性能減水剤 (ポリカルボン酸系, 密度 1.08g/cm^3)

表 4 コンクリートの割合

水結合材比 W/B(%)	単位量 (kg/m^3)						混和剤 使用量 ($B \times \%$)
	W	C	S1	S2	G	SF	
16	160	900	136	317	848	100	1.5

表 5 フレッシュ性状

試験場所	スランプ フロー (cm)	50cm フロー 到達時間 (sec)	空気量 (%)	コンクリート 温度 ($^{\circ}\text{C}$)
出荷時	76.5	5.2	2.0	21.0
荷卸時	72.5	5.8	2.2	20.8

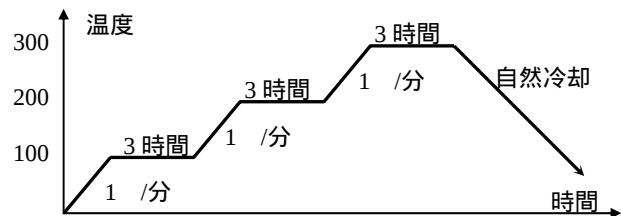


図 1 加熱スケジュールの一例(300 の場合)

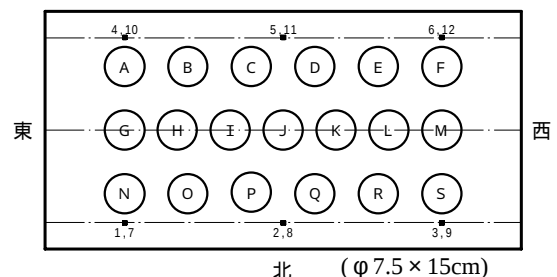
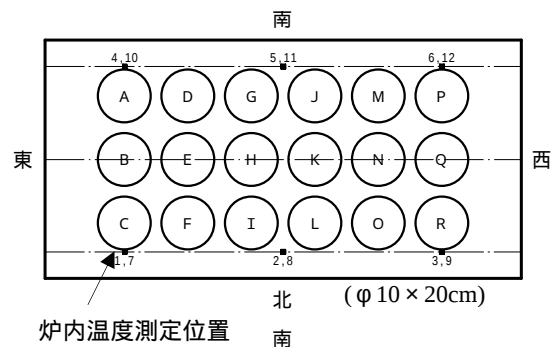


図 2 コンクリート試験体の加熱時の配置

§3. 実験結果

3.1 コンクリート

1) 目視観察

各温度に加熱した後の試験体は、加熱温度が高くなるに従って、加熱後の表面が白く(薄く)なる傾向にあり、800 に加熱した試験体は、ややピンクがかかった色となっていた。また、加熱温度 200 以下では 0.05mm 以下、400 では 0.08mm、600 では 0.3mm、800 では 0.7mm 程度の亀甲状のひび割れが観察された。

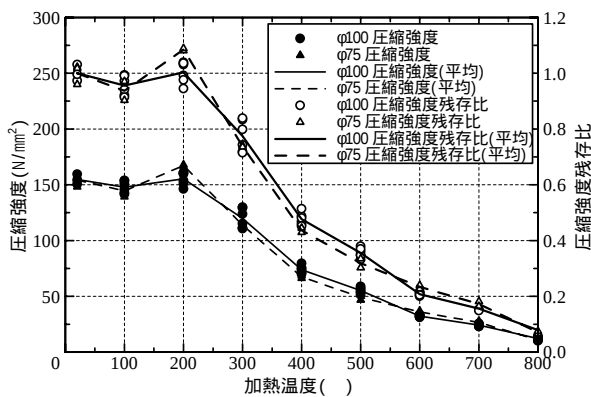


図3 加熱温度と圧縮強度の関係

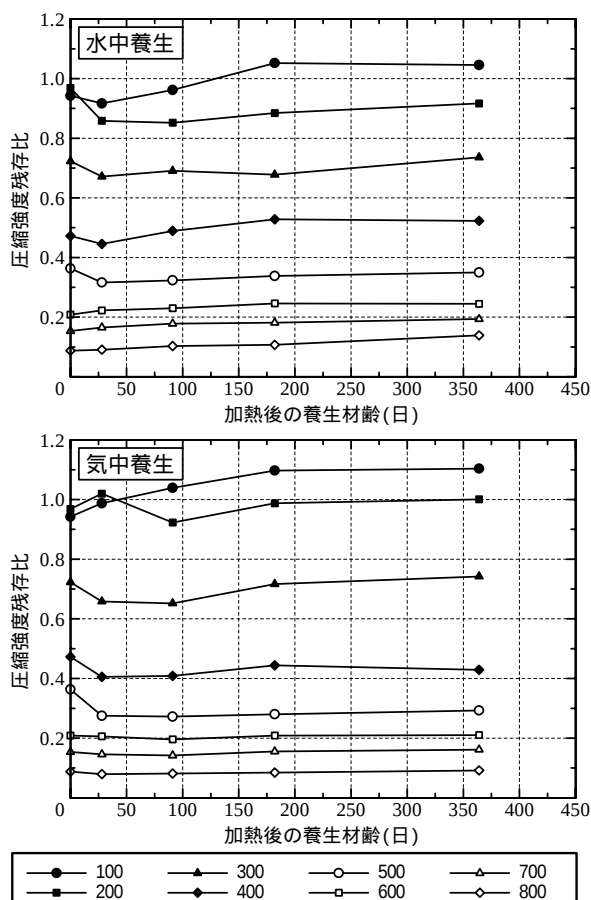


図4 養生材齢と圧縮強度残存比の関係

2) 圧縮強度

加熱直後における加熱温度と圧縮強度および圧縮強度残存比(常温時の圧縮強度に対する各加熱温度における圧縮強度の比)の関係および $\phi 10 \times 20\text{cm}$ 試験体の加熱後の各養生条件における材齢と圧縮強度残存比の関係をそれぞれ図 3,4 に示す。

圧縮強度は、加熱温度 200 までは常温時と同程度の強度を示し、200 を超えると強度低下を示した。圧縮強度残存比で比較すると、200 までは 0.94 ~ 1.08 であるが、300 で 0.8、500 で 0.3 強、800 では 0.1 以下であった。また、試験体形状の違いによる顕著な差はなかった。

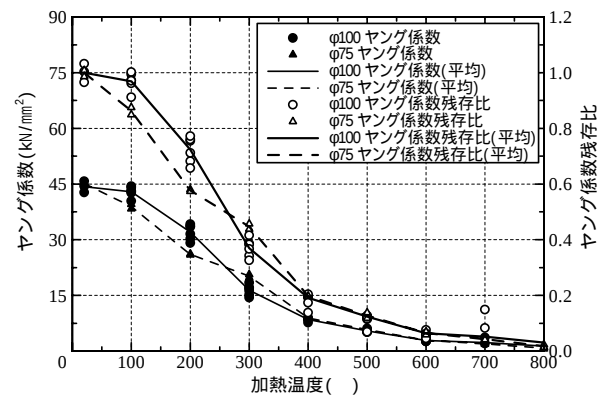


図5 加熱温度とヤング係数の関係

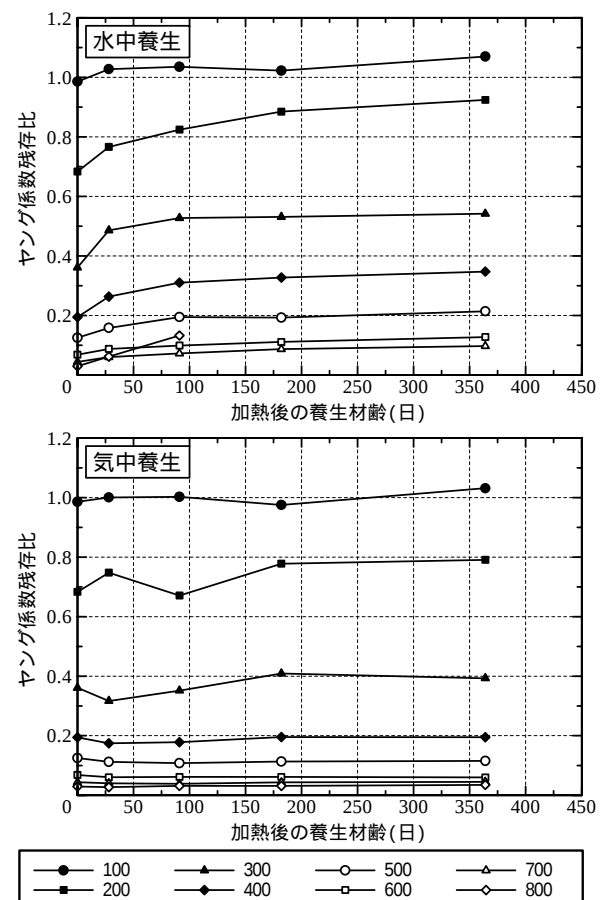


図6 養生材齢とヤング係数残存比の関係

加熱後の 1 ヶ月経過時の圧縮強度残存比は、加熱温度 500 までは文献 1)と同様に若干減少する傾向にあるが、加熱温度が 500 を超えると、その傾向は見られず、ほぼ横ばいの状態であった。また、加熱後の養生期間が 1 ヶ月以降 1 年間までの強度回復は普通強度コンクリートほど顕著ではなく、ほぼ横ばいの状態であった。また、養生条件の違いによる圧縮強度残存比は、水中養生したものの方が若干高いものの、それほど顕著ではなく、普通強度コンクリートと比較して、加熱後 1 年間程度の養生ではほとんど強度回復が期待できないことが分かった。

3)ヤング係数

加熱直後における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加熱温度におけるヤング係数の比)の関係、および $\phi 10 \times 20\text{cm}$ 試験体の加熱後の各養生条件における材齢とヤング係数残存比の関係をそれぞれ図 5,6 示す。

ヤング係数は、加熱温度 100 までは常温時と同程度であるが、100 を超えると加熱温度の上昇に伴って低下する傾向にあった。ヤング係数残存比で比較すると、100 で 0.91 ~ 1.00 であるが、300 で 0.4、500 で 0.1 強、800 では 0.03 程度であった。また、試験体形状の違いによる顕著な差は無かった。

加熱後 1 年間水中養生したものは、加熱直後に対して回復傾向を示し、その程度は加熱温度が高いものほど顕著であったが、ヤング係数残存比で見ると、300 で 0.54、500 で 0.21 となり、文献 1)と比較して半分程度の値であった。加熱後の養生条件で比較すると、気中養生したものは、加熱直後に対して、最大でも 18%程度の回復にとどまり、水中養生と比較してほとんどヤング係数の回復が無いことが分かった。また、水中養生した試験体のヤング係数は、養生開始後 1 ヶ月での回復が大きく、その後の回復は非常に緩やか、あるいはほぼ横ばい状態であった。

4)応力 - ひずみ関係

加熱直後および加熱後 1 年間各養生条件で養生した試験体の応力 - ひずみ関係をそれぞれ図 7 ~ 9 に示す。

加熱温度 100 および 200 では、圧縮強度およびヤング係数にもほとんど差が無いことから分かるよう、応力 - ひずみ関係に差は見られない。一方、加熱温度が 300 を超えると 1 年間養生したものの方が曲線の勾配が急になっており、ヤング係数の回復を示している。特に、水中養生したものの回復が大きい。加熱温度と最大応力時のひずみの関係を図 10 に示す。1 年間気中養生したものは、加熱直後と比較して差は見られないが、水中養生したものは最大時応力時ひずみが小さくなる傾向が見られた。

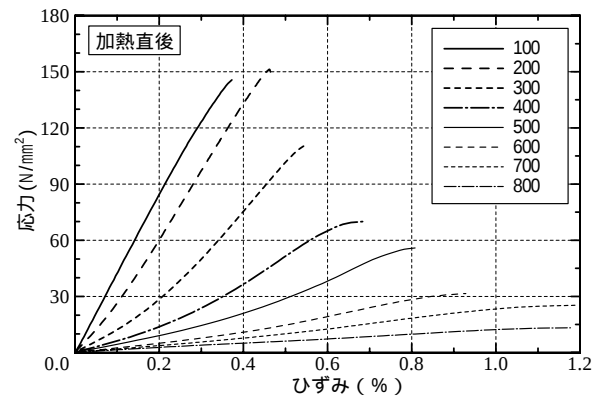


図 7 コンクリートの応力 - ひずみ関係(加熱直後)

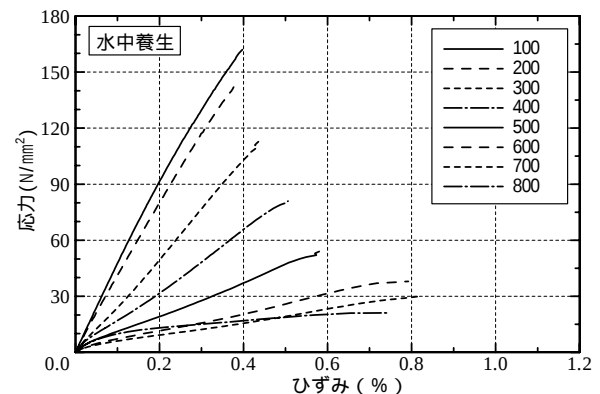


図 8 コンクリートの応力 - ひずみ関係(1 年間水中養生)

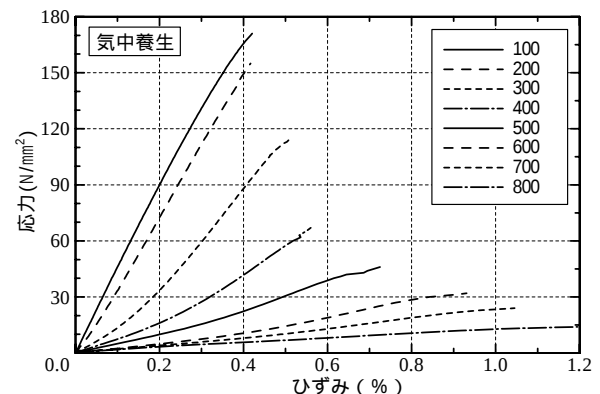


図 9 コンクリートの応力 - ひずみ関係(1 年間気中養生)

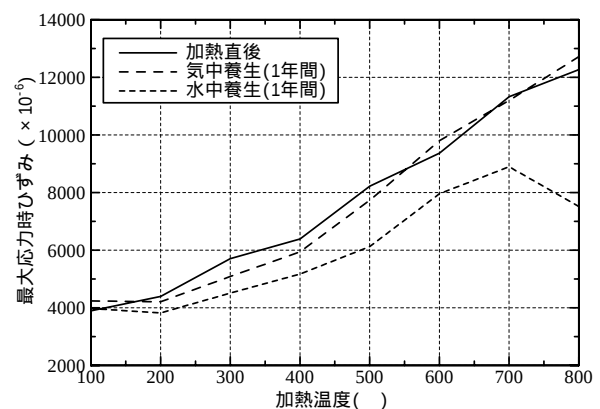


図 10 加熱温度と最大応力時ひずみの関係

3.2 鉄筋

1) 応力 - ひずみ関係

鉄筋の応力 - ひずみ関係を鋼種毎に図 11 に示す。USD685 は加熱温度が 600 , SBPD1275 は 300 まで常温の応力 - ひずみ関係と差が無く、それを超えると降伏強度および引張強度の低下に伴い下方にスライドする形状を示した。高温加熱時の素材試験⁴⁾では、加熱温度が 200 を超えると明確な降伏棚が無く、600 を超えるとひずみ硬化も見られなかったが、加熱冷却後においては加熱温度 800 まで降伏棚およびひずみ硬化が見られた。また、弾性係数は常温から 800 までほとんど差がなく、今回の実験の範囲では加熱後常温まで冷却することにより、ほぼ回復することが分かった。

2) 降伏強度

加熱温度と降伏強度残存比(常温時の降伏強度に対する各加熱温度における降伏強度の比)を図 12 に示す。USD685 は 600 , SBPD1275 は 300 を超えるとほぼ直線的に降伏強度残存比が低下した。降伏強度残存比は、USD685 では、800 で 0.7 程度、SBPD1275 では、400 で 0.9、600 で 0.5、800 で 0.3 程度であった。

3) 破断伸び

加熱温度と破断伸びの関係を図 13 に示す。破断伸びは、降伏強度残存比の低下と連動するように USD685 では 600 , SBPD1275 では 300 を超えるあたりから大きくなる傾向が見られた。

§4 . まとめ

超高強度材料(コンクリートおよび鉄筋)の高温加熱後の素材実験を行い、以下の知見を得た。コンクリートに関しては、1) 圧縮強度およびヤング係数は、加熱温度の上昇に伴い大きく低下する。2) 圧縮強度は、普通強度コンクリートほどの期待できないが、300 以下の加熱であれば常温時の 8 割程度まで回復する。3) 加熱後に水中養生することにより圧縮強度およびヤング係数の回復が期待できる。鉄筋に関しては、1) USD685 では 600 , SBPD1275 では 300 を超えると降伏強度および引張強度が直線的に低下する。2) 弾性係数は、常温まで冷却することによりほぼ常温時の値まで回復する。

参考文献

- 1) 原田 有:建築耐火構法, 工業調査会, 1973
- 2) 一瀬 賢一他: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, 2003.7
- 3) 道越 真太郎他:火災加熱を受けた異形PC鋼棒の強度およびその推定方法, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海), A-2, pp.177-178, 2003.9
- 4) 松戸 正士他:高強度鉄筋の高温引張試験, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海), A-2, pp.175-176, 2003.9
- 5) 西田 浩和他: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集, Vol.26, No.1, pp.393-398, 2004.7

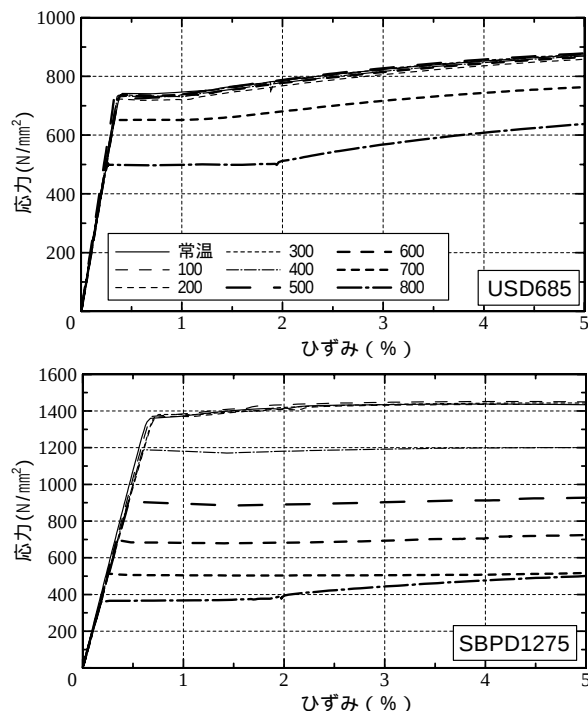


図 11 鉄筋の応力 - ひずみ関係

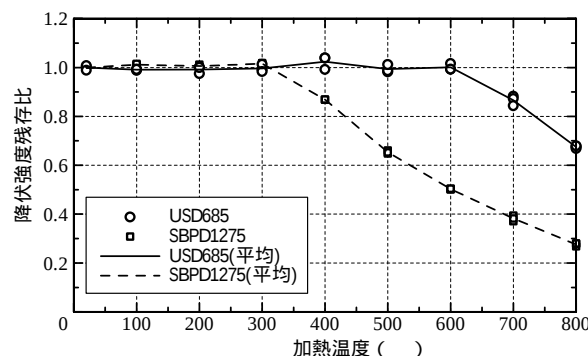


図 12 加熱温度と降伏強度残存比の関係

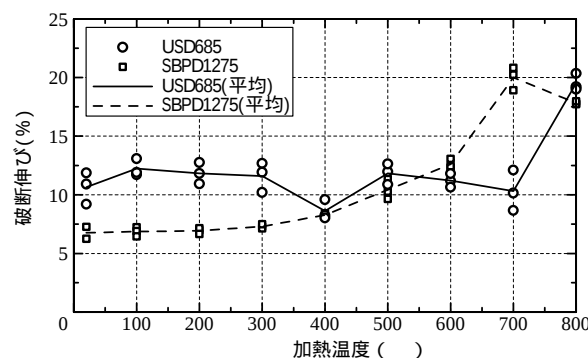


図 13 加熱温度と破断伸びの関係



松戸 正士

ひとこと

今回のような素材レベルの実験は非常に期間を要する実験ですが、火災後の部材の性能把握を目指して、更なる実験データの蓄積を進めていく予定です。