

高強度鉄筋コンクリート用棒鋼の耐火性能

馬場重彰・小林裕・道越真太郎

Keywords: fire resistance, high strength concrete, RC rebar

耐火性能，高強度コンクリート，鉄筋コンクリート用棒鋼

1. はじめに

鉄筋コンクリート造建物の火災時挙動を検討する際、鉄筋コンクリート部材を構成する材料の高温時挙動の把握が必要であるが、昨今、コンクリートの高強度化にともない使用されつつある高強度鉄筋コンクリート用棒鋼（USD685）はその高温特性が十分に把握されているとはいえない。そこで、火災を想定した高温領域での熱間引張試験を実施してそれらの高温特性を把握するとともに、高温時の応力-ひずみ関係のモデル化を試みる（SD390およびSD490における同様な試みは、既に文献1）がある）。

さらに、火災後の補修方法の策定に資する目的で加熱冷却後の引張試験を実施して、それらの機械的性質を把握する。

2. 高温引張試験

2.1 試験体

高温引張試験一覧を表-1に示す。今回、試験片の鋼種をUSD685(D22)とした。

試験片は、素材を加工せずに引張試験を実施することを原則とした（以後、本試験方法を試験法Aと表記する）が、試験機の制約上、800 および1000 の試験では、JIS G 0567（鉄鋼材料及び耐熱合金の高温引張試験方法）に規定されている試験片を作成し、JIS G 0567 に基づいた試験を実施した（以後、本試験方法を試験法Bと表記する）。また、試験方法が鋼棒の機械的性質におよぼす影響を検討するため、試験温度 600 では2種の試験方法で試験を実施する。

試験温度は、常温、100、200、300、400、500、600、800、1000 の9水準とした。

2.2 試験方法

試験方法を図-1に、試験速度を図-2に、高温引張試験風景を写真-1に示す。高温引張試験の手順を以下に示す。

表-1 高温引張試験片一覧
List of high temperature tensile test

鋼種	試験方法	試験温度（ ）								
		常温	100	200	300	400	500	600	800	1000
USD685 (D22)	試験法A	○	○	○	○	○	○	○		
	試験法B							○	○	○

試験片の一端を試験機にセットする。

電気炉により、試験片を所定の温度まで上昇させる。その際、熱電対を用いて、試験片温度を測定する。

試験片が試験温度に達した後、15分間その温度を保持して、試験片を一樣な温度にさせる。

試験片の片端を固定する。

歪速度を0.5mm/minとして載荷し、10%程度までデータを採取する。計測は電気炉外に設置した伸び計を使用して行い、伸び量を標点距離で除すことにより、ひずみを測定した。

なお、試験法Aではひずみ10%時点で試験を終了したが、試験法Bではひずみ10%以降では載荷速度を7.5mm/minとして破断まで行った。

2.3 試験結果

USD685の高温特性を図-3に示す。同図には、高温時の応力-ひずみ関係、試験片のひずみが1%に達した時点での応力度(1%耐力)、引張強さ、1%耐力と引張強さのそれぞれの常温下での値に対する比率(強度残存率)を示している。

(1)高温時の応力-ひずみ関係

試験温度100 までは降伏棚が認められるが、200 以上の試験ではそれが不明瞭になっている。引張強さはひずみが10% までにはあらわれているが、600 以上の試

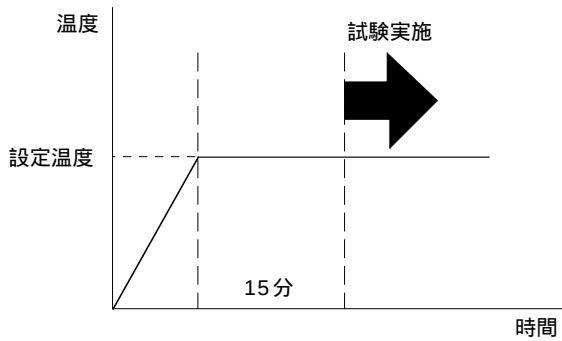


図-1 高温引張試験方法
Method of high temperature tensile test

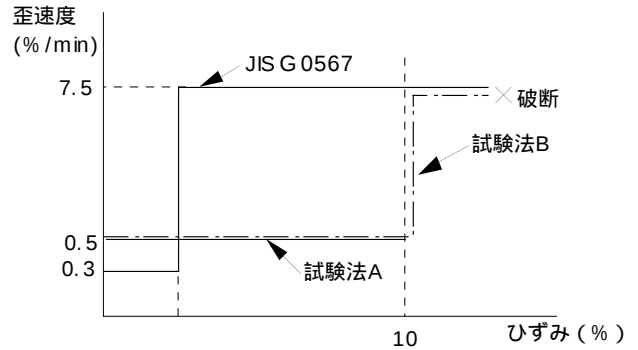


図-2 試験速度
rate of test

験では、ひずみ硬化はほとんど認められない。

(2) 1% 耐力および引張強さ

1% 耐力は温度上昇とともに徐々に低下し、強度残存率は300 で0.90, 600 で0.38, 800 では0.07である。引張強さは、200 程度においても常温時のそれより上昇せず、試験温度とともに徐々に低下する。引張強さの強度残存率は、400 で0.80, 600 で0.32, 800 で0.06程度である。

1% 耐力と引張強さの強度残存率を比較すると、300 までは1% 耐力の方が小さく、400 でほぼ同じになり、500 と600 では逆に引張強さの方が小さい。また、800 および1000 ではほぼ同一の値となった。なお、強度に関しても、600 ～ 1000 では、1% 耐力と引張強さはほぼ同じである。

次に、文献1)に示されているSD490の試験結果と比較すると、引張強さは400 まではほぼ同じ強度残存率を示したが、400 以降のそれはUSD685の方が小さかった。

(3) 試験方法による相違

試験方法の相違による応力-ひずみ関係への影響を検

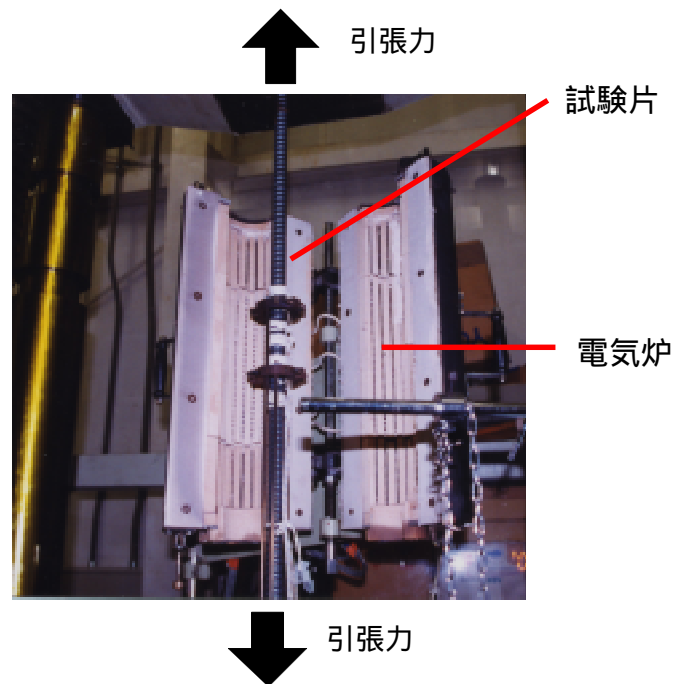
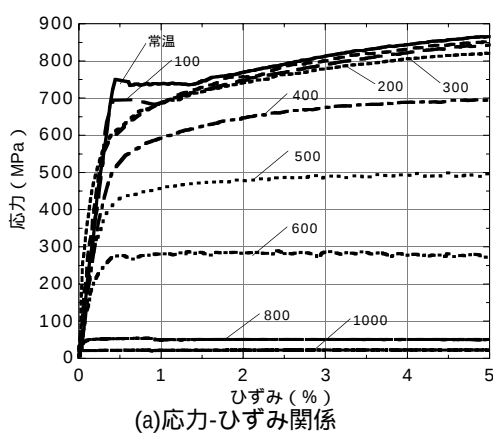
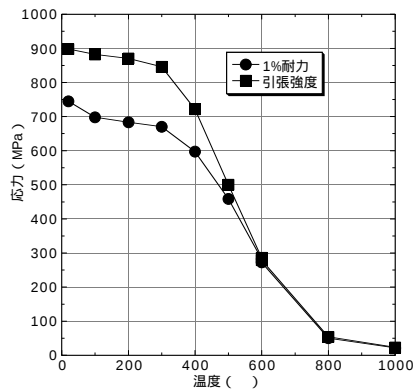


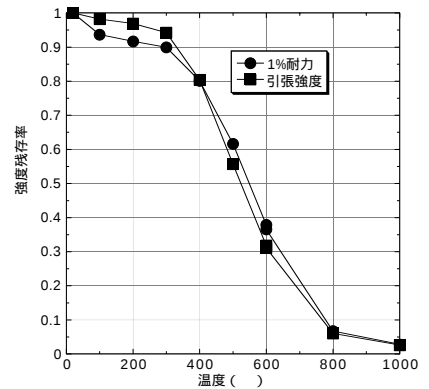
写真-1 高温引張試験風景(試験法Aの場合)
High temperature tensile test scenery



(a) 応力-ひずみ関係



(b) 1%耐力および引張強さ



(c) 強度残存率

図-3 USD685の高温特性
High temperature characteristics of RC rebar (USD685)

討する。試験温度 600 における試験法 A および試験法 B の試験結果を比較した結果、試験方法による高温特性への影響はほとんど認められなかった。

2.4 高温時応力-ひずみ関係のモデル化

本節では、高温時における応力-ひずみ関係のモデル化を試みる。

ひずみ度を弾性ひずみと塑性ひずみの和とし、(1)式の Ramberg-Osgood型のモデルで表現する。

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_p \quad (1)$$

ここで、

$$\varepsilon_e = \sigma / E_t, \quad \varepsilon_p = (\sigma / \sigma_k)^k$$

σ : 応力度, E_t : t におけるヤング係数
 σ_k, k : 塑性ひずみを定める定数

$$E_t = E_{20} \times (1 - 1.11 \cdot 10^{-6} \cdot t^2) \quad (2)$$

(1)式において、ヤング率の温度依存性は便宜的に文献 2)により(2)式としたが、試験温度 1000 の場合のみ 800 のヤング率を採用し、 σ_k および k は試験データより算出した。以上の手法により算出した USD685 の結果を表-2示す。また、モデル化された USD685 の応力-ひずみ関係を図-4に示す。図-2(a)と図-4より、良く対応おり、以上から、ひずみ 5% 程度までの範囲で、妥当なモデル化と考える。

表-2 諸定数の算出結果
Estimated results of factors

	温度 (°C)								
	常温	100	200	300	400	500	600	800	1000
E_t ($\times 10^4$ MPa)	17.1	16.9	16.3	15.4	14.1	12.4	10.3	4.95	4.95
σ_k (MPa)	1033.5	1028.4	1134.3	1026.6	828.6	576.8	312.4	63.1	24.3
k	17.6	16.0	10.6	13.3	14.7	22.0	49.5	32.1	42.2

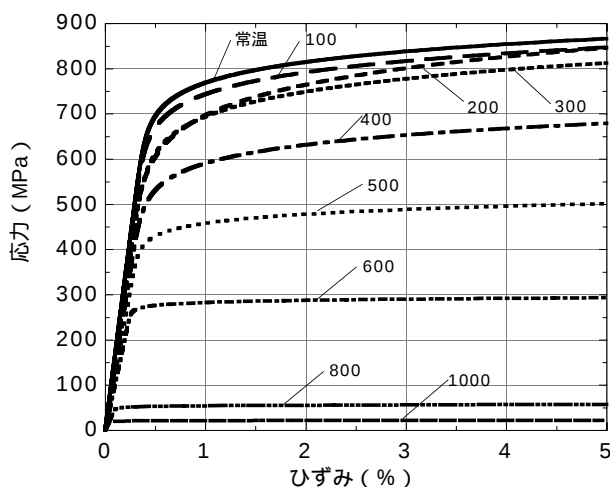


図-4 高温時応力-モデル関係のモデル化
Modeling of stress-strain relationships at high temperature

3. 高温履歴を受けた鋼棒の引張試験

3.1 試験計画

加熱冷却試験一覧を表-3に示す。

火災の規模をあらわす指標として、等価火災時間 (ISO-834 による火災継続時間) を考える。ここでは、等価火災時間を 30, 60, 90, 120, 180 分の 5 水準とする。

加熱冷却試験方法を以下に示す。

まず、代表的な高強度鉄筋コンクリート断面として、図-5を仮定する。各々の等価火災時間に応じて 2 次元の差分法熱伝導解析を行い、主筋(SD490, USD685)、帯筋および断面中心の温度履歴をもとめる。次に、鉄筋 (SD490, USD685(D25)) を電気炉により昇温冷却し、所定の履歴を受けた鉄筋において、常温で JIS Z 2241 (金属材料引張試験方法) にもとづく加熱冷却後の引張試験を行う。測定項目は、降伏強度(または 0.2% 耐力)、引張強度、破断伸びである。

3.2 温度結果

最高履歴温度の一覧を表-4に、熱伝導解析結果の一例として、等価火災時間 60 分における帯筋、主筋および断面中心の温度を図-6に示す。

3.3 高温履歴を受けた鋼棒の引張試験

SD490 および USD685 の等価火災時間と降伏強度、最大強さおよび破断伸びの関係を図-7 ~ -8 に示す。

図-7 ~ -8 より、降伏強度、引張強度および破断伸びともに常温時のそれと比較して低下は認められず、いずれも規格値を満足していた。

表-4 加熱冷却試験一覧
List of post-fire test

鋼種	等価火災時間 (分)				
	30	60	90	120	180
SD490 (D25)	○	○	○	○	○
USD685 (D25)	○	○	○	○	○

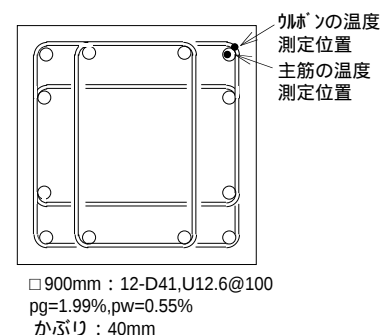


図-5 仮定した鉄筋コンクリート断面
Assumed RC section

表-4 最高履歴温度の一覧

List of the highest history temperatures

等価火災時間 (分)	計算時間 (分)	帯筋 ()	主筋 ()	断面の中心 ()
30	360	273	187	32
60	420	421	290	45
90	540	540	368	68
120	600	635	437	82
180	840	776	558	119

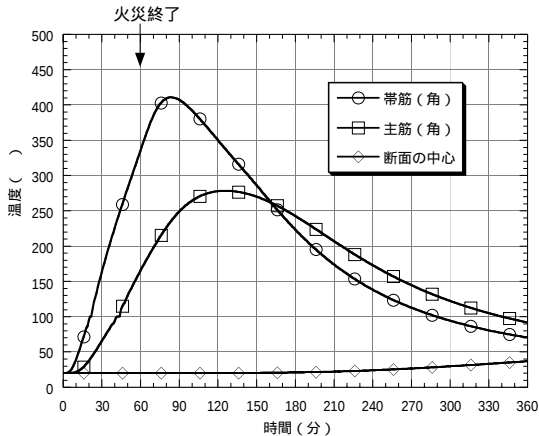


図-6 熱伝導解析結果の例(等価火災時間60分の場合)
Example of heat conduction analysis result

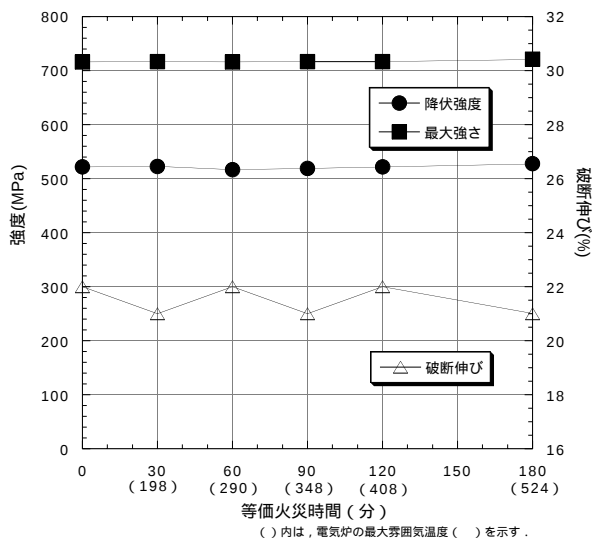


図-7 加熱冷却後の機械的性質 (SD490の場合)
Material properties of post-fire (SD490)

5. まとめ

高強度鉄筋コンクリート用棒鋼の火災時および火災後の検討を実施するため、高温引張試験および加熱冷却引張試験を実施した。

(a) 高温引張試験

高強度鉄筋コンクリート用棒鋼の高温引張試験を実施し、それらの高温特性を把握した。

応力-ひずみ関係のモデル化を試み、Ramberg-Osgood型の非線形特性で良好にモデル化できることがわかった。

(b) 加熱冷却試験

火災を受けた高強度鉄筋コンクリート用棒鋼の加熱冷却試験を実施し、それらの特性を把握した。

SD490およびUSD685は、等価火災時間30～180分の火災では、火災を受けた後も常温の機械的性質とほとんど変化がなかった。

参考文献

- 1) 長尾覚博他：鉄筋コンクリート用棒鋼の高温引張試験結果，日本建築学会大会学術講演梗概集 A-2，2000年9月，pp. 75-76．
- 2) 上杉英樹，小池浩：高層鉄骨架構の熱応力解析，日本建築学会構造系論文報告集，第381号，1987年11月，pp. 73-80．

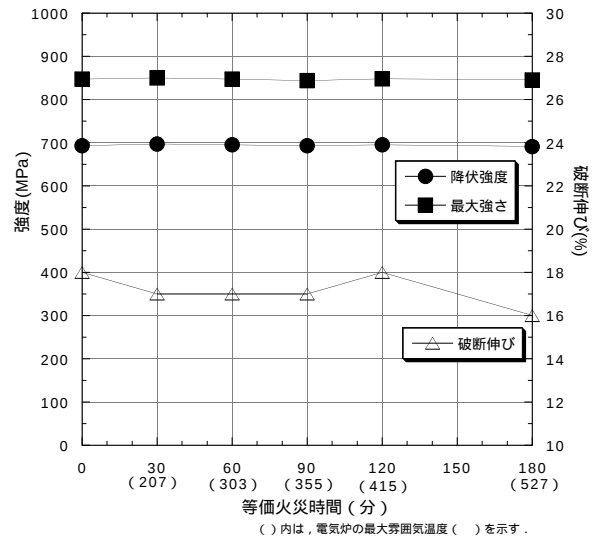


図-8 加熱冷却後の機械的性質 (USD685の場合)
Material properties of post-fire (USD685)