

論文 高温におけるコンクリートと鉄筋の付着-すべり関係に関する研究

富永 暖子*1・西山 峰広*2・坂下 雅信*3

要旨: 高温下でコンクリートシリンダーからの鉄筋の引き抜き試験を実施し、付着応力-すべり関係を得た。実験変数は温度であり、常温と、100℃～600℃まで 100℃刻みで設定した。常温でのコンクリート圧縮強度試験値は、23.9 N/mm²、鉄筋降伏強度試験値は、383 N/mm²である。得られた付着応力-すべり関係は、*fib Model Code 2010* の常温時の付着応力-すべり関係モデルに基づきモデル化した。

キーワード: 付着応力-すべり関係, 耐火, 高温, コンクリート, 鉄筋

1. はじめに

鉄筋とコンクリート間の付着は、終局時においては、抜け出しによる付加変形などにおいて考慮されるものの、長期荷重下においては、完全付着として、すべりは生じないとして扱われている。しかし、高温下では、コンクリートと鉄筋材料自体のヤング係数と強度が低下するため、付着剛性と強度も低下する。過去の研究として Huang¹⁾によって高温下における付着応力-すべり関係モデルが提案されているが、実験データがほとんどないのが現状である⁴⁾⁻⁶⁾。

本研究では、常温から 600℃までの温度下で行ったコンクリートシリンダーからの鉄筋引き抜き試験について報告する。また、得られた付着特性に関するデータを用い、*fib Model Code 2010* の常温における付着応力-すべり関係モデルに基づき、高温下での付着応力-すべり関係のモデル化を行う。

2. 高温下での鉄筋引抜き試験

2.1. 試験体概要

試験体を図-2-1に示す。試験体は埼玉大学の睦好らが行った FRP の高温付着引抜き試験²⁾を参考にした。直径 150mm、高さ 300mm のコンクリートシリンダーに異形鉄筋 SD345 の D19 を埋め込んだ。付着区間はシリンダー中央部で 76mm とし、JCI の引抜き試験(案)³⁾を参考にした。付着区間の上下は、試験体を均一に熱するための非付着区間とした。載荷時のコンクリート早期割裂破壊を防止するため、スパイラル筋を試験体中央に配置した。コンクリートの力学的特性を表-2-1に、鉄筋の力学的特性を表-2-2に、鉄筋の表面形状(JIS 規格)を表-2-3に示す。実験変数は試験体温度とし、常温と、100℃～600℃まで 100℃刻みで設定した。ひとつの設定温度に対して 3 体の試験体を用意した。

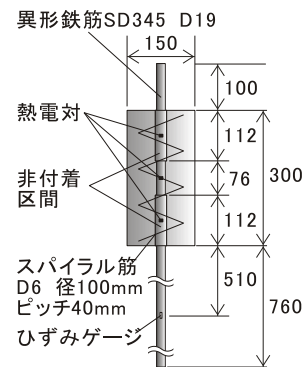


図-2-1 試験体図

表-2-1 コンクリートの力学特性 (常温)

設計強度 (MPa)	圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)
21.0	23.9	24.1

表-2-2 鉄筋の力学特性 (常温)

断面積 (mm ²)	降伏強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)
286.5	383	504	192

表-2-3 鉄筋の表面形状

節間隔*1 (mm)	節の高さ		節の隙間の和 (mm)
	最大値 (mm)	最小値 (mm)	
13.4	2.0	1.0	15.0

*1: 節の平均間隔の最大値, *2: 節の隙間の和の最大値

2.2. 加熱方法および載荷方法

実験装置を図-2-2に示す。加熱には、円筒型高温用マントルヒーターを用いた。試験体を効果的に熱せられるように、マントルヒーターの内側寸法を試験体シリンダ

*1 京都大学大学院工学研究科建築学専攻 大学院生

*2 京都大学大学院工学研究科建築学専攻 教授・博士(工学)

*3 京都大学大学院工学研究科建築学専攻 助授・博士(工学)

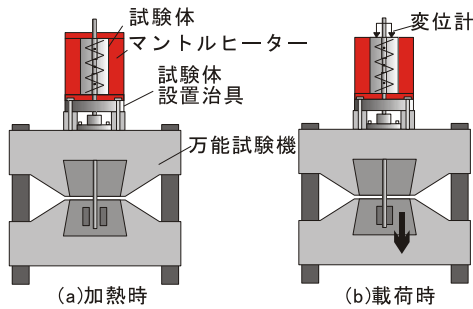


図-2-2 荷重装置

一寸法と同様のφ150mm×300mmとした。一瀬らの研究⁴⁾で、コンクリートの熱間圧縮試験の際に、昇温速度が2.5~7.5°C/minの範囲であれば、昇温速度による高温時の圧縮強度への影響はほとんどないとしていることから、ヒーターの温度上昇速度は3°C/minと設定した。実験における内部温度分布の例を図-2-3に示す。試験体中央部の温度が設定温度となるようにしたため、炉内設定温度(試験体外周に取り付けた炉内温度を制御するための熱電対より得られる)を予め目標温度よりも高めに設定し、試験体の中央部温度が目標温度に達した時点で荷重を開始した。この加熱方法では、試験体中心部と表面間で温度差が生じるが、付着性能は鉄筋および鉄筋周辺のコンクリートの力学性状によるところが大きいため、この加熱方法が付着性能に与える影響は少ないと思われる。

荷重装置には万能試験機を用いた。万能試験機上部に反力を取るための鉄板を設置し、そこへ試験体のシリンダー部を置き、試験機下部のチャックで鉄筋を掴み、下方向へと引抜いた。荷重速度は、JCIの引抜き試験(案)³⁾によると、「荷重は衝撃を与えないように、なるべく様な速度で加えなければならない。荷重速度は鉄筋の引張応力度が毎分49.0N/mm²以下となるようにする。」とされているので、それ従って、荷重速度は49.0N/mm²×286.5mm²=14.0kN、14kN/minとした。

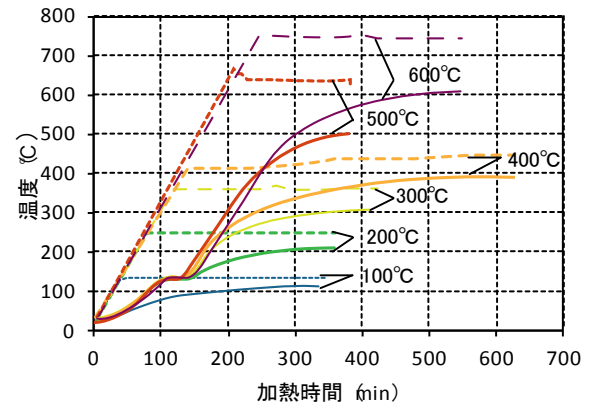
2.3.計測方法

温度測定点は、試験体の内部温度(3点ないし1点)および、炉内温度(上部、中央部、下部の計3点)である。試験体内部3点とは、付着区間内1点と、上下付着区間外の2点である。試験体内部1点の場合は、付着区間内での測定である。荷重は万能試験機ロードセルより得た。試験体鉄筋の自由端に治具を用いて変位計を固定し、コンクリートシリンダーの上面にあて、変位量(めり込み量)を計測した。また、検長2mmの鉄筋ひずみゲージをコンクリートシリンダー下端から510mmのところまで貼り付け、荷重中の鉄筋ひずみを測定した。

2.4.鋼材降伏判定

鋼材の降伏判定は、温度による鋼材の降伏強度低下モデルBS8110⁵⁾を用いて行った。常温時の鉄筋降伏強度に規格降伏強度345MPaを用いて算定した鉄筋降伏時引張

荷重 P_y と、実験時最大引張荷重の平均値 P_{max} を表-2-4に示す。600°Cでは、 $P_y < P_{max}$ となるため、実験中に鉄筋が降伏していた可能性がある。



(実線: 試験体中心部付着区間の温度, 破線: 炉内温度平均値)

図-2-3 試験体と炉内温度分布図

表-2-4 鋼材降伏判定

温度 (°C)	BS8110 による 強度低下率	鉄筋降伏荷重 計算値 P_y (kN)	鉄筋引張荷重 実験値 P_{max} (kN)
20	1.0	97.8	56
100	1.0	97.8	45
200	1.0	97.8	52
300	0.89	87.4	51
400	0.68	66.6	42
500	0.46	45.7	29.5
600	0.26	25.0 (27.8) ^{*1}	26.3

*1:()内の値は常温時の鉄筋降伏強度の実測値383MPaを用いた算出結果

3.実験結果および考察

3.1.付着応力—すべり関係

図-3-1に、各温度における付着応力—すべり関係を示す。最大付着応力と最大付着応力時すべり量の実験値を各温度について表-3-1と表-3-2に示す。温度と最大付着応力時のすべり量との間には相関関係は見られず、また、同一温度下の試験体においてもすべり量についてはばらつきが大きい。

最大付着応力以降については、温度に関わらずほぼ同様の曲線を描く。この領域での付着抵抗機構は、異形鉄筋の節による機械的な抵抗から、主に破壊したコンクリートと鉄筋間の摩擦作用に移行する。以上のことから、本実験の範囲では、すべり10mm以上の領域において、付着応力—すべり関係は温度に依存せず、したがって、コンクリートと鉄筋間の摩擦作用は、温度に依存しないと考えられる。

表-3-1 各温度における付着強度および残存率

温度 (°C)	付着強度(MPa)					残存率
	No.1	No.2	No.3	No.4	平均	
20	12.0	13.1	12.1	—	12.4	1.00
100	10.0	9.6	9.7	—	9.8	0.79
200	11.7 ^{*1}	12.3	10.6	10.8	11.3	0.91
300	12.0	10.4	9.1	—	10.5	0.85
400	9.2	7.7 ^{*2}	7.3	—	8.1	0.65
500	6.4	6.5	6.4	—	6.5	0.52
600	6.2	5.5	4.9	—	5.5	0.44

*1 170°Cで引き抜き試験を行った。

*2 479°Cで引き抜き試験を行った。

表-3-2 各温度における付着強度時のすべり量

温度 (°C)	すべり量(mm)				
	No.1	No.2	No.3	No.4	平均
20	0.65	0.82	0.99	—	0.82
100	0.62	0.66	0.64	—	0.64
200	1.14 ^{*1}	0.59	0.82	1.05	0.85
300	0.82	0.57	0.88	—	0.70
400	1.15	1.04 ^{*2}	1.06	—	1.15
500	1.01	0.94	0.86	—	0.97
600	1.01	0.93	1.36	—	0.97

*1 170°Cで引き抜き試験を行った。

*2 479°Cで引き抜き試験を行った。

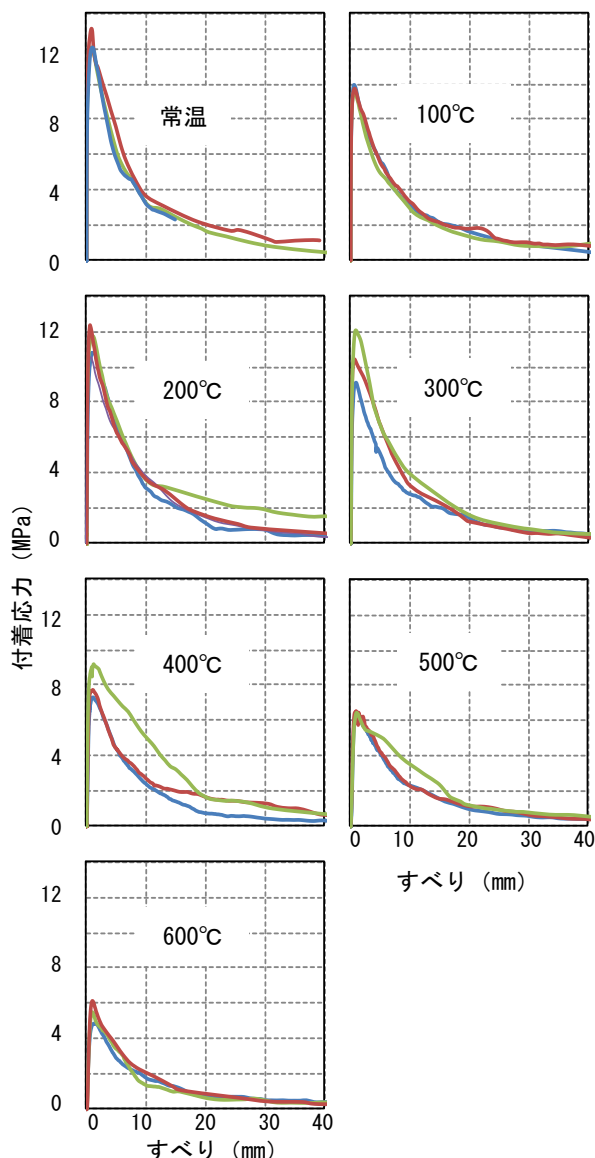


図-3-1 各温度の付着応力—すべり関係

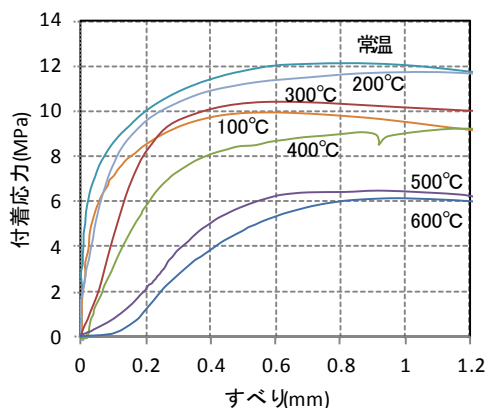


図-3-2 付着応力—すべり曲線剛性比較図

3.2.付着剛性

図-3-2は、各温度における付着応力—すべり関係のすべり量1.2mmまで表示したものである。この図より、温度上昇に伴って付着剛性が低下していることがわかる。特に、400°Cから500°Cの間では著しく低下している。鉄筋コンクリート梁部材において、長期荷重下でも、引張鉄筋には付着応力が生じており、火災による温度上昇に伴って付着剛性が低下することで、主筋のすべり量が増大し、したがって、部材の剛性が低下し、たわみの増大につながると考えられる。

3.3.最大付着応力

図-3-3に最大付着応力—温度関係を示す。100°Cにおいて一旦低下した最大付着応力は、200°Cにおいて常温時での強度程度まで回復する。常温から100°Cにかけて一旦低下した最大付着応力が200°Cにおいて回復するという挙動は、コンクリートの熱間圧縮試験の既往データと酷似しており、コンクリート圧縮強度の低下が最大付着応力低下に対して影響すると考えられる。しかし、既往の付着試験データ^{2),6),8)}では、このような挙動は示されていない。100°Cでのコンクリート熱間圧縮強度の低下理

由としては、骨材膨と同時に遊離水の蒸発によってセメント水和物の収縮が生じ自己ひずみ応力が発生するため、また 200℃での強度回復については、遊離水の蒸発によってセメント粒子の水和が促進されるからである⁹⁾。200℃以上において最大付着応力は低下していくが、400℃から 500℃にかけての低下が顕著である。500℃以上ではポルトランドセメントの主要構成鉱物の分解が影響していると考えられる⁹⁾。

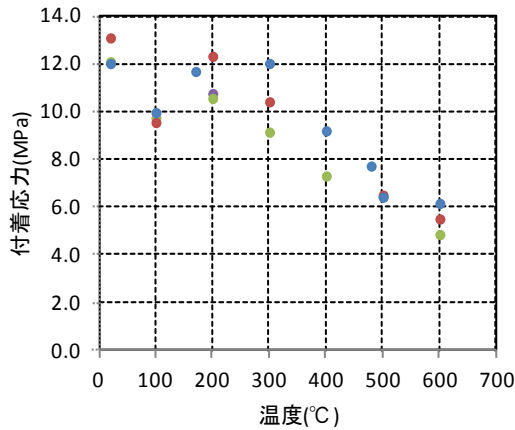


図-3-3 最大付着応力—温度関係

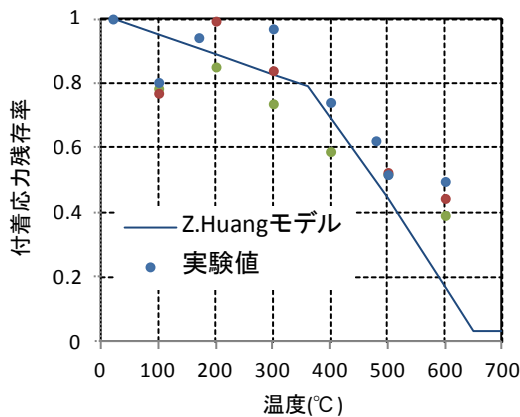


図-3-4 最大付着応力残存率

図-3-4 に最大付着応力残存率—温度関係を示す。図より、100℃と 600℃以外では実験値と Huang モデルは概ね一致していることが分かる。しかしながら、実験結果では 500℃から 600℃での最大付着応力の低下は、Huang モデルと比べて小さくなっている。

3.4. 試験体の破壊機構

本試験体では、スパイラル筋を用いてコンクリートを拘束しているため、コンクリートシリンダー表面まで到達するような鉄筋軸方向の割裂ひび割れは観察されなかった。つまり、本実験における試験体の付着破壊機構は節間コンクリートの圧密破壊か、せん断破壊のどちらかであると考えられる。図-3-5 に節間コンクリートの受ける応力状態を示す。圧密破壊時には σ_r が、せん断破壊時には σ_s が最大付着応力を決定づける因子になる。 σ_r 、 σ_s

はともに、コンクリートの圧縮強度 f_c' に依存する。高温時に f_c' が低下することによって、最大付着応力が低下する。コンクリート同様、鉄筋の降伏強度およびヤング係数も温度上昇に伴って低下する。本実験では、600℃での実験を除いて鉄筋は降伏しておらず、温度上昇によるヤング係数の低下が剛性やすべり量に関係していると推察される。

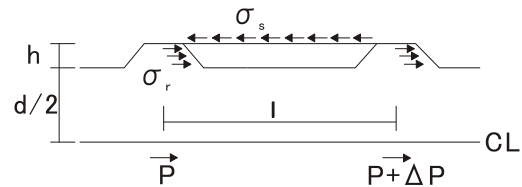


図-3-5 節間コンクリートの応力状態

4. 付着応力—すべり関係のモデル化

fib Model Code 2010 の付着応力—すべり関係モデルを式(1)に、モデル図を図-4-1 に、異形鉄筋に対するパラメータを表-4-1 に示す。

$$\begin{aligned} \tau &= \tau_{max} \left(\frac{s}{s_1}\right)^\alpha & 0 \leq s \leq s_1 \\ \tau &= \tau_{max} & s_1 \leq s \leq s_2 \\ \tau &= \tau_{max} - (\tau_{max} - \tau_f) \left(\frac{s-s_2}{s_3-s_2}\right)^\alpha & s_2 \leq s \leq s_3 \\ \tau &= \tau_f & s_3 \leq s \end{aligned} \quad (1)$$

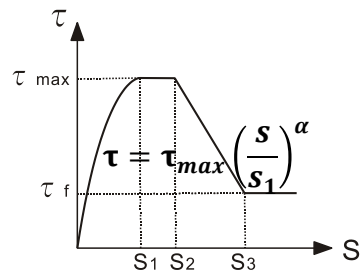


図-4-1 式(1)による付着応力—すべり関係

表-4-1 式(1)のパラメータ

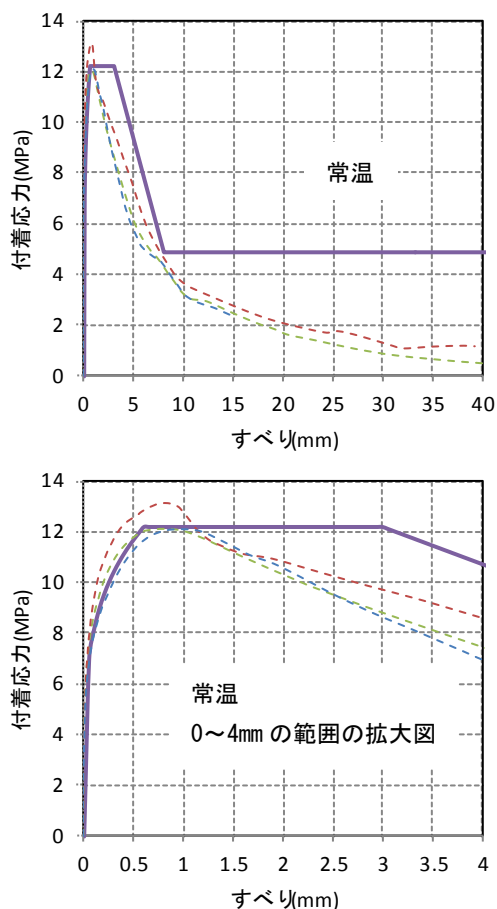
Bond Conditions	Unconfined concrete		Confined concrete	
	Good	All other	Good	All other
s_1	0.6mm		1.0mm	
s_2	0.6mm		3.0mm	
s_3	1.0mm	2.5mm	Clear rib spacing	
τ_{max} (MPa)	2.0 (f_c') ^{1/2}	1.0 (f_c') ^{1/2}	2.5 (f_c') ^{1/2}	1.25 (f_c') ^{1/2}
τ_f (MPa)	0.15) _{max}		0.40) _{max}	
α	0.4			

fib Code モデル式を、本実験試験体の常温時における付着応力-すべり関係に適用する。条件として Confined concrete, Good bond condition とする。コンクリート圧縮強度に基づき、 $\tau_{max} = 12.2 \text{ MPa}$, $\tau_f = 4.9 \text{ MPa}$ となる。また、使用した鋼材の実測値から $s_3 = 8.0 \text{ mm}$ とした。常温における付着応力-すべり関係の実験値とモデルの比較を図-4-2 に示す。fib Code モデルは、最大付着応力および最大付着応力時すべり量については実験値を精度よく模擬できている。しかし、最大付着応力以降の挙動は実験値とは異なる。

次に、長期荷重による火災時の付着劣化を考慮するため、各温度における最大付着応力に至るまでの付着応力-すべり曲線のモデル化を行った。fib Code モデルのパラメータを本実験値に適合するように温度の関数として表した。本モデル化は最大付着応力に至るまでとすることから、使用するパラメータは、 τ_{max} , s_1 , α である。

最大付着応力時すべり量 s_1 は温度には依存しないようであることから、温度に関わらない値として 0.6 mm とした。

fib Code モデルは以下の式(2)で τ_{max} を与えている。



(実線：モデル，破線：実験値)
図-4-2 付着応力-すべり関係の比較 (常温)

$$\tau_{max} = 2.5(f'_c)^{1/2} \quad (2)$$

この f'_c に、日本建築学会で提案されている高温時コンクリート強度低下率⁹⁾を代入して表すもの(以下モデル A)と、fib Code モデルの常温時 τ_{max} に Huang が提案する高温時付着強度低下率を乗じて表すもの(以下モデル B)の2通りを考えた。得られた最大付着応力残存率-温度関係を実験と比較して図-4-3 に示す。なお、高温時コンクリート強度低下率は、実験で使用したコンクリートの配合に基づき、 $W/B=0.624$ として計算している。図-4-3 を見る限り、 100°C においてはモデル A の方が実験値に近いものの、その他の温度ではモデル B の方が実験値をよく模擬できている。そこで、最大付着応力は、モデル B を採用し、式(3)、式(4)で表すこととする。

$$\tau_{\tau,T} = \kappa_{\tau,T} \times 2.5(f'_c)^{1/2} \quad (3)$$

$$\kappa_{\tau,T} = 1.0 - \frac{0.22}{360}(T - 20) \quad T_1 \leq T \leq T_2$$

$$\kappa_{\tau,T} = 0.78 - \frac{0.75}{270}(T - 380) \quad T_2 \leq T \leq T_3 \quad (4)$$

$$\kappa_{\tau,T} = 0.03 \quad T_3 \leq T$$

$$T_1 = 20^\circ\text{C}, T_2 = 380^\circ\text{C}, T_3 = 650^\circ\text{C}$$

α は、 s_1 および τ_{max} が決定している状態で、実験値を精度よく表せるよう、式(5)のような温度の関数とした。

$$\alpha(T) = 0.0012T + 0.2 \quad (5)$$

以上をまとめ、高温時の付着応力-すべり関係の提案モデルのパラメータを表-4-2 に示す。各温度における提案モデルと実験との比較を図-4-4 に示す。Huang の最大付着応力残存率が実験と大きく異なる 600°C を除けば、各温度における付着応力-すべり関係を従来モデルはよく再現できている。

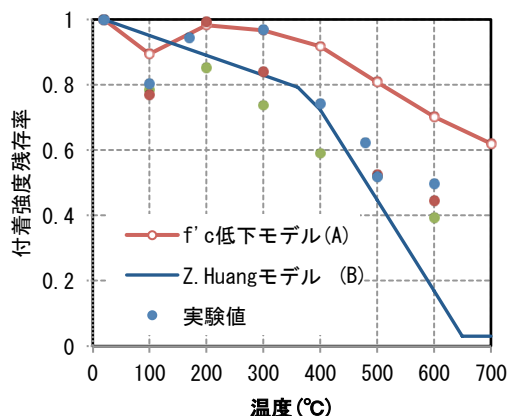


図-4-3 付着応力残存率 - 温度関係の比較

表-4-2 付着応力 - すべり関係のパラメータ

s_1 (mm)	α	τ_{max} (MPa)
0.6	$0.0012T + 0.2$	$\kappa_{\tau,T} \times 2.5 (f'_c)^{1/2}$

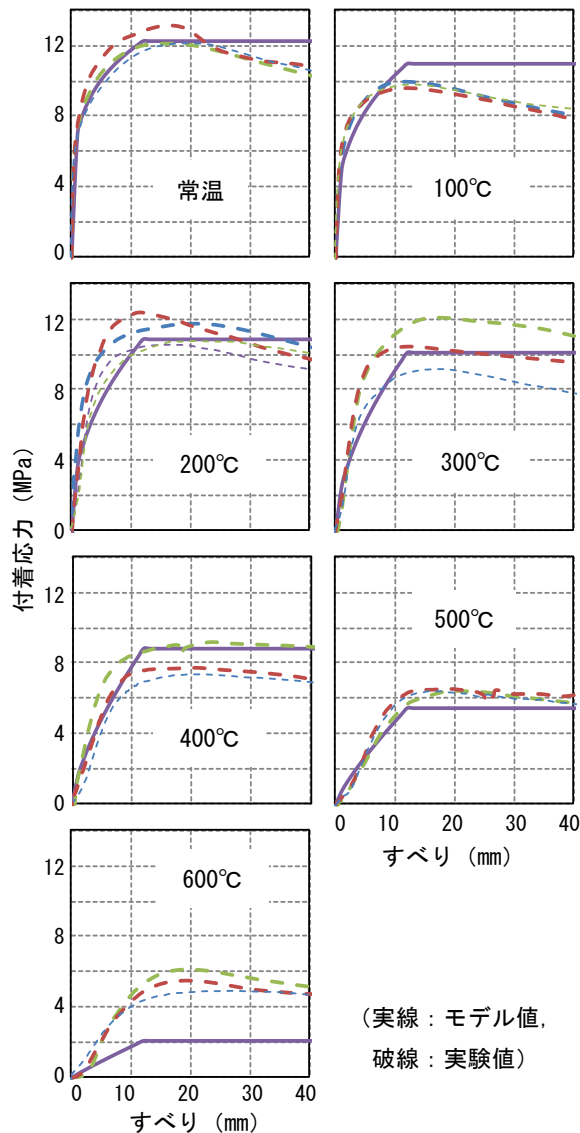


図-4-4 提案モデルと実験値の比較

5. まとめ

本研究では、温度をパラメータとしてコンクリートシリンドーからの鉄筋の引き抜き試験を行い、付着応力-すべり関係を得た。また、実験データに基づき、*fib Model Code 2010* のモデルを用いて、高温時付着応力-すべり関係のモデル化を行った。以下に得られた結果についてまとめる。

- (1) 実験結果より、最大付着応力は、常温から一旦 100°C で低下するが、200°C で回復し、以降 600°C まで低下し続けた。これは、コンクリートの熱間圧縮強度の挙動と酷似しており、コンクリートの圧縮強度低下が最大付着応力の低下に大きく影響しているものと考えられる。
- (2) Huang が提案するモデルと本実験結果の付着強度残存率は 100°C と 600°C を除いて概ね一致した。600°C における本実験結果は、Huang が提案する最大付着応

力の低下ほど低下しなかった。

- (3) *fib Model Code 2010* の付着応力-すべり関係モデルを基に、最大付着応力までの付着応力-すべり関係をモデル化した。各種パラメータは温度の関数として表した。このモデルは、本実験結果のみに基づいており、コンクリート圧縮強度や鉄筋降伏強度あるいは種類が異なる場合に適用できるようにするためにはさらに実験データが必要である。

謝辞

本研究の実施にあたり、林成俊氏、大田周平氏、野村昌弘氏のご尽力があった。本研究は、日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究(A) 23246101 「材料構成則と部材変形解析に基づく建築骨組の損傷制御型構造・耐火調和設計法の開発」(研究代表者: 西山峰広京都大学教授)の助成を受けたものである。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) Zhaohui Huang: Modelling the bond between concrete and reinforcing steel in a fire, *Engineering Structures* 32 (2010), pp.3660-3669
- 2) 角田敦, 睦好宏史, 田邊一仁, 宮村太輔: 連続繊維補強材の耐熱性状に関する研究, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.27, No.2, pp.1387-1392, 2005
- 3) 村田二郎: 引抜き試験による鉄筋とコンクリートとの付着強度試験方法(案), *コンクリート工学*, Vol.23, NO.3, pp.8-11, 1985.3
- 4) 一瀬賢一, 長尾覚博, 川口徹: 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, *コンクリート工学年次論文報告集*, Vol.21, No.2, pp.1105-1110, 1999
- 5) 松戸正士ら: 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)*, pp.175-176, 2003.9
- 6) 佐藤尚, 睦好宏史, 田邊一仁, 角田敦: FRP を補強筋に用いたコンクリート部材の耐熱性状に関する研究, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.25, No.1, pp.329-334, 2003
- 7) 睦好宏史, 佐藤尚, 角田敦: 炭素・アラミド繊維棒材を補強筋に用いたコンクリート部材の耐火性能に関する研究, *埼玉大学地域共同センター紀要*, 2, pp.105-108, 2001
- 8) U.Diederichs, U.Schneider: Bond strength at high temperatures
- 9) 日本建築学会: 構造材料の耐火性ガイドブック 2009, pp.40-54