

論文 高温加熱後の超高強度コンクリートの引張強度と付着強度

松戸 正士^{*1}・西田 浩和^{*1}・片寄 哲務^{*2}

要旨: 超高強度コンクリートの加熱冷却後の力学的性質に関する基礎データを収集することを目的とし、引張および付着強度に関する実験を行った。その結果以下のことが分かった。1)加熱冷却後の引張強度と付着強度は、温度上昇による強度低下の傾向が見られる。2)加熱冷却後の引張強度は、加熱冷却後の圧縮強度と比例関係にあるが、W/B=15%での加熱温度300°C以下の範囲では、加熱冷却後の圧縮強度とは比例せず、加熱冷却による影響が大きい。3)付着強度残存比は、加熱温度が400°C以上の範囲では加熱冷却後の圧縮強度と比例関係にあるが、加熱温度が300°C以下の範囲では、圧縮強度と直接の相関が見られなかった。

キーワード: 超高強度コンクリート, 引張強度, 付着強度, 圧縮強度, 高温加熱後

1. はじめに

近年の高層建築物の更なる高層化により、構造部材に用いる材料強度は益々上昇傾向にある。最近では、設計基準強度(以下、 F_c)150N/mm²級のコンクリートの研究開発も多方面で進められている中^{例えば1)}, $F_c=130\text{N/mm}^2\sim 150\text{N/mm}^2$ 級のコンクリートを用いた超高層建築物が建設されたという報告もある。^{例えば2)}

このような超高層建築物では、個々の部材に非常に大きな荷重が作用しており、火災を受けた後の部材の補修・交換は非常に困難であることが予測される。従って、火災を受けた後の部材性能を的確に予測する手法、および火災後にそのまま再利用出来る(あるいは軽微な補修で済む)防火対策手法が必要である。そのためにも、火災を受けた後の部材の構成材料の力学的性質を把握することが重要となる。

本論文は、超高強度コンクリートを用いた鉄筋コンクリート造建築物の火災後の部材性能を把握する手法の開発に向けて実施した、超高強度コンクリートの加熱冷却後の力学的性質に関する実験結果をまとめたものである。具体的には、 $F_c=100\text{N/mm}^2$ を超えるコンクリートの加熱冷却後の引張強度および付着強度に関して検討した結果を述べる。

2. 実験概要

2.1 実験条件

引張強度実験および付着強度実験の実験条件を表-1、表-2にそれぞれ示す。引張強度実験の実験条件は、加熱温度9水準(非加熱を含む)および水結合材比(以下、W/Bという)2水準とし、付着強度実験の実験条件は、加熱温度8水準(非加熱を含む)とした。

2.2 試験体

引張強度実験用の試験体は、「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。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、高温加熱を加えるまでは標準養生とした。付着強度実験用の試験体は、一辺が64mm(埋め込んだ鉄筋径の4倍)、高さ100mm(同約6倍)の直方体状の中央に鉄筋(D16)を定着筋として埋め込んだ。鉄筋とコンクリートの付着区間は試験体の自由端側に設けた。埋め込み長さは64mm(同4倍)とした。尚、文献3)では、試験体の一辺の長さは、埋め込んだ鉄筋径の6倍を推奨しているが、試験体の一辺の長さが埋め込んだ鉄筋径の4倍~10倍までであれば破壊時にコンクリートに働くフープテンションはほとんど変わらないこと⁴⁾、高温度においてすべり破壊を起こさないこと⁵⁾を考慮し

*1 (株)フジタ 技術センター 主任研究員 工修 (正会員)

*2 (株)フジタ 技術センター 研究員 工修 (正会員)

て設定した。また、試験体の載荷側には、載荷板からの局所応力が付着性状に与える影響を緩和するために鉄筋径に対して約 2 倍の非付着区間を設けた。コンクリートの打設は鉄筋を水平にして行った。鉄筋の据付方向は、鉄筋のふしが中心軸を含み鉛直に向くようにした。型枠は材齢 1 週で脱型し、高温加熱を加えるまで実験室内での封かん養生とした。

コンクリートの使用材料、調合、高温加熱前の強度試験結果および鉄筋の力学的性質を表 3～6 にそれぞれ示す。

2.3 加熱実験方法

試験体の加熱は、プログラムによる温度調整機能を有した箱型電気炉(内法:W450×D900×H570mm)を用いた。

引張強度実験用の加熱スケジュールは、予備実験の結果⁹⁾から昇温速度を 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、目標温度到達後は、試験体内部温度の均一化を測るため、上記プラス 1 時間停滞させることとした。付着強度実験用の加熱スケジュールは、昇温速度を 1℃/分とし、目標温度到達後は、試験体中心温度が概ね目標温度に到達するまで保持 (2 時間～5 時間) した。目標温度での停滞後はいずれも自然冷却とした。

加熱実験時の試験体の配置および温度測定位置を図 1 に示す。引張強度実験用では φ100×200mm、付着強度実験用では 100×100×64mm の試験体中心温度測定用の試験体を配した。

2.4 強度実験方法

引張強度実験は、「JIS A 1113(コンクリートの割裂引張強度試験方法)」に準拠した。測定は、100kN 万能試験機による荷重を読み取った。

付着強度実験は、「引き抜き試験による鉄筋とコンクリートの付着強度試験方法(案)」³⁾に準拠した。加力は単調荷重とし、鉄筋径の 2 倍の孔径を有する加圧板上に試験体を据え、球座を介して鉄筋を引き抜いた(図 2)。また、鉄筋の自由端でのすべりを測定した。

表 1 実験条件 (引張強度実験)

項目	条件	水準数
加熱温度 T(℃)	20 (非加熱), 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800	9
水結合材比 W/B (%)	15, 25	2

表 2 実験条件 (付着強度実験)

項目	条件	水準数
加熱温度 T(℃)	20 (非加熱), 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700	8

表 3 コンクリートの使用材料及び調合(引張)

W/B (%)	単位量(kg/m ³)				SP (B×%)
	W	B	S	G	
15	150	1000	488	837	1.80
25	160	640	764	837	0.90

[使用材料] 水(W):上水道水, セメント(B):シリカフェーム混入セメント, 密度 3.08g/cm³, 細骨材(S):桜川産砕砂, 表乾密度 2.58g/cm³, 吸水率 1.97%, 粗骨材(G):桜川産砕石 2005, 表乾密度 2.65g/cm³, 吸水率 0.62%, 混和剤(SP):高性能減水剤 ポリカルボン酸系

表 4 コンクリートの使用材料及び調合(付着)

W/B (%)	単位量(kg/m ³)						SP (B×%)
	W	B	S	G	E	H	
14	150	1082	417	822	25	5	2.60

[使用材料] 水(W):上水道水, セメント(B):シリカフェーム混入セメント, 密度 3.08g/cm³, 細骨材(S):桜川産砕砂, 表乾密度 2.59g/cm³, 吸水率 0.60%, 粗骨材(G):桜川産砕石 2005, 表乾密度 2.65g/cm³, 吸水率 0.35%, 膨張材(E):石灰系膨張材, 収縮低減剤(H):ポリエーテル誘導体, 混和剤(SP):高性能減水剤, ポリカルボン酸系

表 5 コンクリートの強度試験結果(加熱前)

W/B	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	強度時歪 (×10 ⁻⁶)	試験材齢 (日)
14	175.0	45.99	3990	91
15	176.4	47.38	4133	188
25	136.6	44.70	3698	188

表 6 鉄筋の力学的性質

種類	降伏強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
D16(USD-685)	792	220.5	971

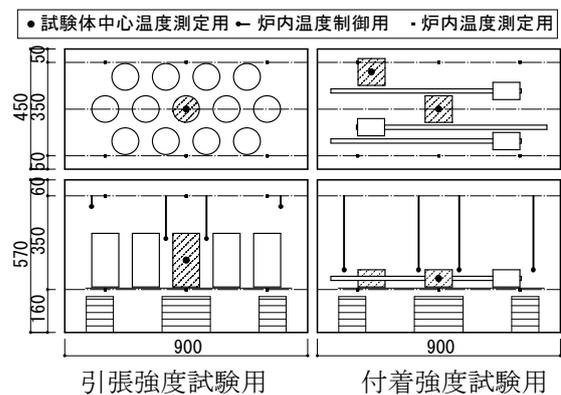


図 1 加熱実験時の試験体の配置

3. 実験結果

3.1 加熱実験

加熱実験による温度測定結果を表-7に、試験体中心温度履歴を図-3、4にそれぞれ示す。

試験体の中心温度は、各加熱温度到達時点において、目標温度に対して、引張強度実験用の試験体で-74℃~-33℃、付着強度実験用の試験体で-45℃~-13℃の範囲にあった。これに対して、目標温度での停滞時間経過以降では、引張強度実験用の試験体で-10℃~+3℃、付着強度実験用の試験体で+3℃~+5℃の範囲にあり、両強度実験用試験体とも試験体全域に亘りほぼ目標とした加熱温度を受熱したと考えられる。尚、引張強度実験用の試験体温度の方が付着強度実験用の試験体温度と比較して受熱温度が若干低かった。これは、使用した電気炉に対して試験体の数が多かったことが影響しているものとする。

また、付着強度用試験体の加熱温度 400℃の加熱において、3体の内1体の自由端側のコンクリート隅角部において、鉄筋が現れる程度の大きさで、三角錐状に爆裂しているものが見られた。

3.2 引張強度実験結果

引張強度実験結果一覧を表-8に、加熱温度と引張強度との関係を図-5に、加熱温度と引張強度残存比（常温時の引張強度に対する各加熱温度における引張強度の比）との関係を図-6にそれぞれ示す。尚、表-8、図-6には本実験と同時に加熱し冷却後に圧縮強度実験を実施した結果⁶⁾を、図-6には既往の加熱温度と引張強度残存比の関係式^{7),8)}もあわせて示してある。

引張強度は、加熱温度 100℃でやや低下し、同 200℃で回復する傾向を示していた。回復の度合いは、W/B=25%の方がW/B=15%より大きく、常温強度と同程度まで回復していた。これは、加熱冷却後でも、高温蒸気によりコンクリート中の未水和セメント粒子の水和が促進されたものと考えられる⁹⁾。また、加熱温度 200℃以下の範囲では実験値のばらつきも大きかった。一方、同 300℃以上では加熱温度の増加に伴い強度低下し、実験値のばらつきも小さくなっていった。

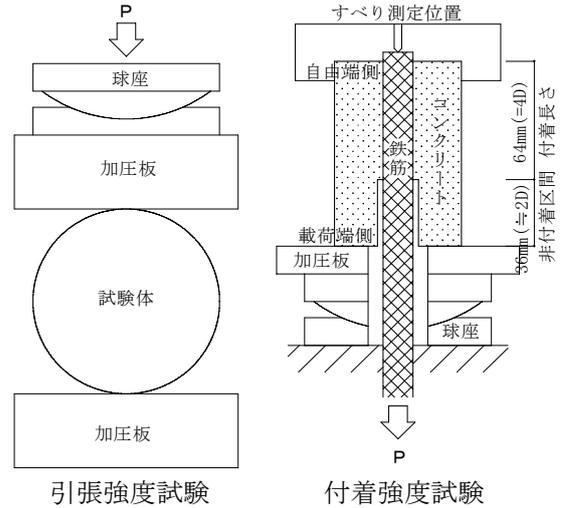


図-2 強度試験方法

表-7 加熱実験による温度測定結果(単位:℃)

加熱温度	引張強度実験用		付着強度実験用	
	炉内最高温度	試験体中心最高温度	炉内最高温度	試験体中心最高温度
100	127.8	98.6	108.3	103.1
200	224.6	190.1	208.2	202.8
300	321.0	298.6	310.6	304.6
400	420.8	402.3	406.6	403.4
500	519.5	502.6	506.7	504.9
600	616.5	601.5	607.7	604.2
700	712.8	703.3	706.7	703.8
800	812.7	799.4	-	-

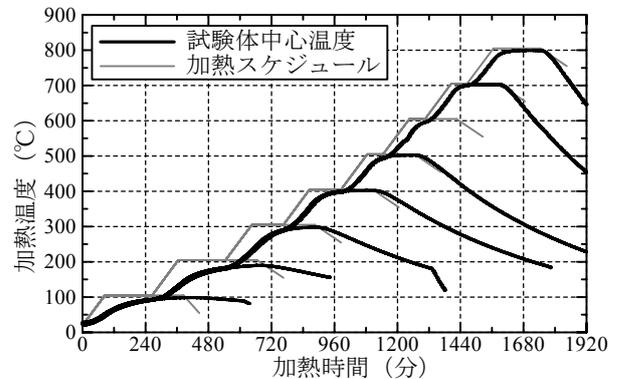


図-3 温度履歴（引張強度実験用）

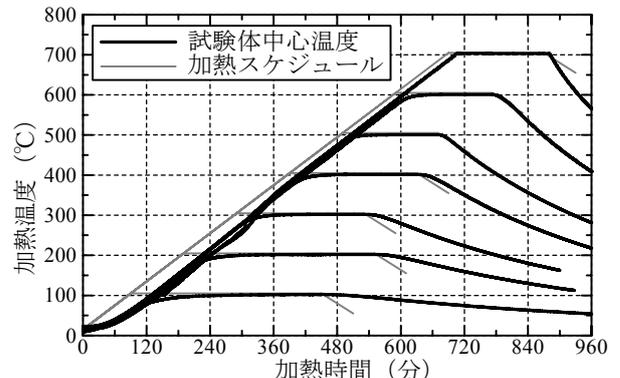


図-4 温度履歴（付着強度実験用）

引張強度残存比では、加熱温度 200℃までは 0.71~1.07 とばらついていましたが、それ以上の加熱温度では、400℃で 0.6, 600℃で 0.3, 800℃で 0.2 程度となっていた。これを、加熱冷却後の圧縮強度実験結果⁶⁾と比較すると、加熱温度 300℃以降では、W/Bの違いによらず強度残存比はほぼ同じ値となっていた。一方、加熱温度 100℃および 200℃ではW/Bの違いによる差が生じていた。W/B=25%においては、引張強度残存比は圧縮強度残存比とほぼ同じ値であった。しかし、W/B=15%では、引張強度残存比は圧縮強度残存比より小さい値となっていた。また、既往の関係式との比較では、加熱温度 300℃以降はほぼ同じ値となっているが、加熱温度 200℃までは実験値のばらつきもあり差が生じていた。

図-7に各加熱温度の圧縮強度と引張強度の関係を示す。ここで、圧縮強度は、本実験と同時に加熱し冷却後に圧縮強度実験を行った結果⁶⁾の平均値を用いている。尚、図中には、既往の高温加熱後の関係式⁷⁾および非加熱の圧縮強度と引張強度の関係式¹⁰⁾をあわせて示してある。

引張強度は加熱冷却による圧縮強度の低下に伴い低下する傾向にあったが、W/Bの違いによる差が生じていた。

W/B=25%における引張強度は、加熱冷却後の圧縮強度の低下に比例して低下する傾向が見られ、加熱冷却後の圧縮強度の約 1/20 であった。これは、文献 7)の関係式と同様の傾向を示していた。また、加熱温度 300℃以下の範囲に対して、同 400℃以上の範囲では、文献 10)の関係式より低い値を示していた。これは、より高温の加熱

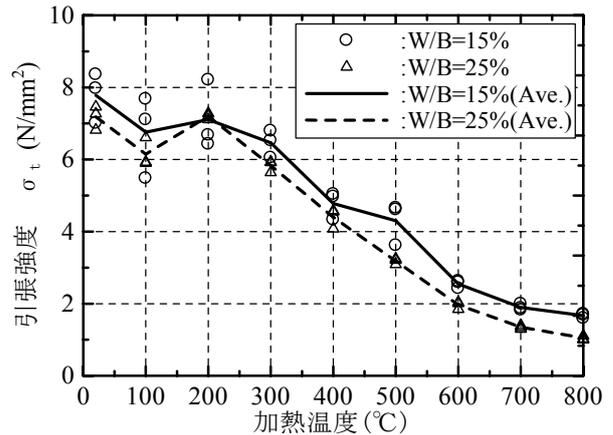


図-5 加熱温度と引張強度

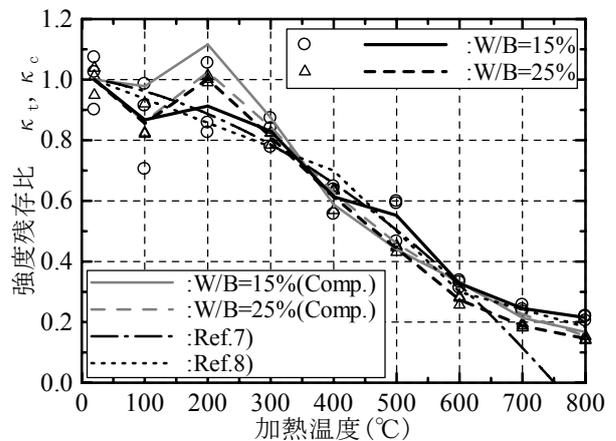


図-6 加熱温度と強度残存比

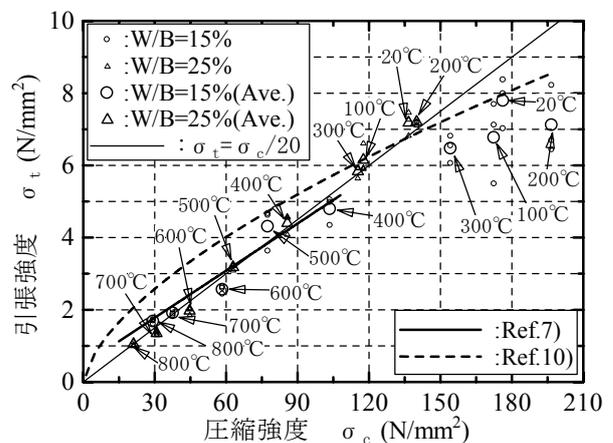


図-7 圧縮強度と引張強度

表-8 引張および圧縮強度実験結果 (平均値)

加熱温度 (°C)	引張強度 σ_t (N/mm ²)		引張強度残存比 κ_t		圧縮強度 σ_c (N/mm ²) ⁶⁾		圧縮強度残存比 κ_c ⁶⁾	
	W/B=15%	W/B=25%	W/B=15%	W/B=25%	W/B=15%	W/B=25%	W/B=15%	W/B=25%
20	7.78	7.18	1.000	1.000	176.4	136.6	1.000	1.000
100	6.76	6.15	0.868	0.856	172.6	117.6	0.979	0.861
200	7.11	7.20	0.913	1.002	196.8	140.0	1.116	1.025
300	6.46	5.83	0.830	0.811	154.4	115.3	0.875	0.844
400	4.78	4.40	0.614	0.613	103.7	85.7	0.588	0.627
500	4.30	3.18	0.552	0.443	77.6	62.9	0.440	0.460
600	2.55	1.97	0.328	0.274	58.6	44.7	0.332	0.327
700	1.90	1.35	0.245	0.188	37.8	30.8	0.214	0.226
800	1.67	1.05	0.215	0.146	29.5	21.1	0.167	0.154

冷却による損傷が影響しているものと思われる。

一方、W/B=15%における引張強度は、加熱温度が 400℃以上の範囲では、W/B=25%の結果と同様に、加熱冷却後の圧縮強度の約 1/20 であった。しかし、加熱温度が 300℃以下の範囲では、加熱温度 20℃（非加熱）と 100℃の圧縮強度がほぼ同じであったにもかかわらず、引張強度には、約 1N/mm²の差が生じていた。また、W/B=25%では、加熱温度 20℃（非加熱）と 200℃の引張強度および圧縮強度ともほぼ同じ値であったが、W/B=15%では、加熱温度 200℃の圧縮強度が 20℃（非加熱）より高いのに対して、引張強度は逆に低くなっていた。文献 10)との比較においても 20℃（非加熱）の結果は文献 10)の関係式と良い対応を示していたが、加熱温度 100℃～300℃の範囲では、1N/mm²前後低かった。

以上より、W/B=15%では、加熱温度 300℃以下の範囲において、加熱冷却後の圧縮強度とは比例せず、引張強度への加熱冷却による影響が大きいことが分かった。

3.2 付着強度実験結果

実験結果一覧を表-9に、平均付着応力度-自由端すべり曲線を図-8に、加熱温度と付着強度の関係を図-9にそれぞれ示す。

常温の試験体を含めて全ての加熱温度で鉄筋の降伏前に最大荷重に達した。尚、加熱冷却後の降伏強度が低下する加熱温度 700℃においても鉄筋の降伏には至らなかった。加熱温度 500℃までの試験体は最大荷重に達した時点で、コンクリートが鉄筋軸を含む面で2~4分割に割裂した。それ以上の加熱温度の試験体は、上記と同じ位置に大きなひび割れが発生したものの、割裂までには至らず荷重が徐々に低下した。最大荷重時の自由端のすべりは、加熱温度が高いものほど大きくなる傾向を示していた。

付着強度は、加熱温度 400℃まで常温とほぼ同じ値を示し、それ以上の加熱温度では、加熱温度の上昇とともに強度低下する傾向が見られた。付着強度残存比は、500℃で 0.79, 700℃で 0.46 であった。

表-9 付着強度実験結果（平均値）

加熱温度 (°C)	荷重 P (kN)	付着強度 $\tau_{u,T}$ (N/mm ²)	付着強度残存比 $\tau_{u,T} / \tau_{u,RT}$	推定圧縮強度 σ_{Bi} (N/mm ²)
20	96.8	30.1	1.000	175.0
100	88.7	27.6	0.916	171.3
200	101.5	31.5	1.048	195.3
300	114.6	35.6	1.184	153.1
400	102.9	32.0	1.063	102.9
500	76.7	23.8	0.792	77.0
600	51.4	16.0	0.530	58.1
700	44.4	13.8	0.459	37.5

$$\tau = \frac{P}{4 \cdot \pi \cdot D} \quad \tau : \text{平均付着応力度(N/mm}^2\text{)} \\ P : \text{引抜荷重(kN), } D : \text{鉄筋径(mm)}$$

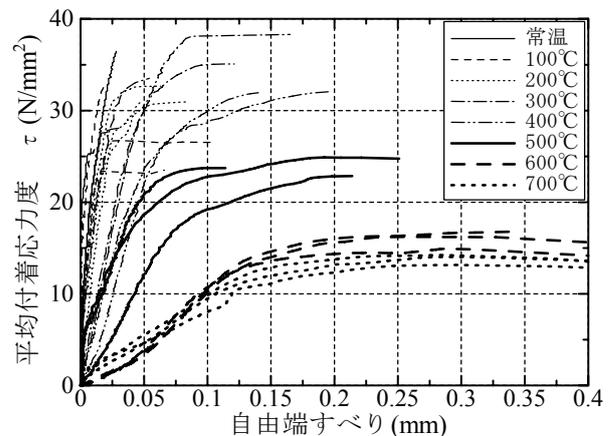


図-8 平均付着応力度-自由端すべり曲線

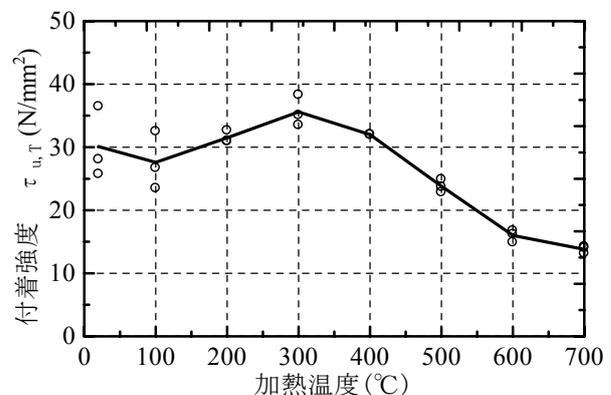


図-9 加熱温度と付着強度

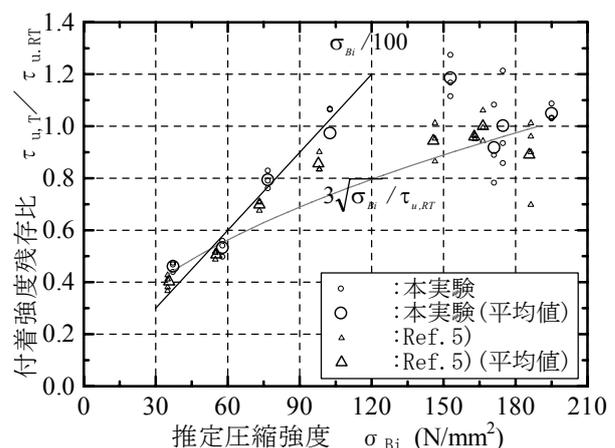


図-10 推定圧縮強度と付着強度残存比

推定圧縮強度と付着強度残存比（常温時の付着強度に対する各加熱温度における付着強度の比）との関係を図-10に示す。ここで、推定圧縮強度とは、加熱前の圧縮強度と表-8に示すW/B=15%の圧縮強度残存比を準用して算出したものである。また、既往の付着強度実験結果⁵⁾もあわせて図示した。

付着強度残存比は、加熱温度が400℃以上の範囲において、加熱冷却後の圧縮強度に比例して低下する傾向が見られ、加熱冷却後の圧縮強度の約1/100であった。一方、加熱温度が300℃以下の範囲では、ばらつきも大きく、圧縮強度と直接の相関が見られなかった。これは、本実験方法による付着実験⁴⁾は割裂が主要因であり、圧縮強度よりは引張強度の影響を多く受けると考えられる。従って、前節で示したW/B=15%におけるこの範囲（加熱温度が300℃以下で、残存圧縮強度が150N/mm²以上の範囲）での引張強度が圧縮強度と比例関係に無く、より熱影響を受けていることが関係しているものと思われる。

4. まとめ

設計基準強度が100N/mm²を超えるコンクリートの加熱冷却後の引張強度および付着強度実験の結果、以下のことが分かった。

- 1) 加熱冷却後の引張強度と付着強度は、温度上昇による強度低下の傾向が見られる。
- 2) 加熱冷却後の引張強度は、加熱冷却後の圧縮強度と比例関係(約1/20)にあるが、W/B=15%における、加熱温度が300℃以下の範囲では、加熱冷却後の圧縮強度とは比例せず、引張強度への加熱冷却による影響が大きい。
- 3) 付着強度残存比は、加熱温度が400℃以上の範囲では加熱冷却後の圧縮強度と比例関係(約1/100)にあるが、加熱温度が300℃以下の範囲では、ばらつきも大きく、圧縮強度と直接の相関が見られなかった。

しかし、今回の結果は、限られた範囲での実験結果であり、非加熱の実験結果も含めて多くの実験データの収集が必要であると考えられる。

参考文献

- 1) 西田浩和, 梶田秀幸, 梅本宗宏, 他 : Fc=150N/mm² 級超高強度コンクリートの製造技術に関する実験的研究(その1~3), 日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿), A-1, pp.327-332, 2005.9
- 2) 柳田裕之, 萩原浩, 岸本均, 梶田秀幸 : Fc=130N/mm² のコンクリート鋼板巻き柱を有する大規模超高層集合住宅の施工, コンクリート工学, Vol.44, No.11, pp.51-57, 2006.11
- 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) 村田二郎, 河合紘茲: 引抜き試験による異形鉄筋の付着強度に関する研究, 土木学会論文集, 第348号, V-1, pp.113-122, 1984.8
- 5) 松戸正士, 西田浩和, 片寄哲務: 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(引き抜き型付着試験による付着強度), 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), A-2, pp.13-14, 2006.9
- 6) 松戸正士, 西田浩和, 片寄哲務, 安部武雄: 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報告集, 第603号, pp.171-177, 2006.5
- 7) 河辺伸二, 一瀬賢一, 川口徹, 長尾覚博: 高温加熱を受けた高強度コンクリートの強度特性に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, pp.377-382, 2003.7
- 8) 本田義博, 大岡督尚, 藤巻敏之: 高強度コンクリートの耐火性能に関する実験的研究(その1 定常温度の一軸試験), 日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿), pp.23-24, 1996.9
- 9) 安部武雄, 古村福次郎, 戸祭邦之, 黒羽健嗣, 小久保勲: 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
- 10) 野口貴文, 友澤史紀: 高強度コンクリートの圧縮強度と各種力学特性との関係, 日本建築学会構造系論文集, 第472号, pp.11-16, 1995.6