

論文 地震火災後の鉄筋コンクリート柱の残存軸圧縮耐力評価法

小西 貴之^{*1}・馬場 望^{*2}・西野 孝仁^{*2}・吉田 正友^{*3}

要旨：比較的大きな地震直後に発生する火災(以下、地震火災という)に対して耐火性能検証法は地震による被災建物を対象としていないことから、地震火災後の建物の構造安全性や再利用の可能性について検討する必要がある。本研究は、普通コンクリートを用いた鉄筋コンクリート(以下、RC という)柱を対象とし、地震火災後の普通コンクリートの RC 柱を想定した部材実験を実施する。さらに、要素試験の結果に基づいて、帯筋による拘束効果を考慮できる加熱冷却後のコンクリート残存圧縮強度の推定式の構築を試み、地震火災後の RC 柱の残存軸圧縮耐力の評価法を確立することを目的とする。

キーワード：加熱冷却後、コンクリート、拘束効果、RC 柱、残存軸圧縮耐力

1. はじめに

RC 構造物が火災を受けた場合、耐火性能検証法によって、その構造安全性が保障されている。一方で、地震火災を受ける RC 構造物については、耐火性能検証法は地震による被災建物を対象としていない。また、地震火災を受けた RC 柱の残存構造性能に関する既往の研究¹⁾によれば、RC 柱の残存軸圧縮耐力は、図-1 に示すようなかぶりおよびコアコンクリートの軸圧縮耐力、および主筋の軸圧縮耐力の累加則に基づいた評価が行われており、RC 柱断面の引張側の主筋が弾性範囲となる程度の被災度であれば、地震被災が火災後の残存軸圧縮耐力に及ぼす影響は小さいことが明らかとされている²⁾。しかしながら、地震被災によって引張側の主筋が引張降伏する場合については、火災後の残存軸圧縮耐力に及ぼす被災度の影響については明らかとされていない。またその際、かぶりおよびコアコンクリートの加熱冷却後の残存圧縮強度は、図-2 に示す実験的に得られた円柱供試体に関する残存圧縮強度比モデル³⁾が適用されている。一方、多くの RC 柱は矩形断面であり、加熱冷却後の円柱供試体の残存圧縮強度を対象とした研究に比べて、矩形断面を有するコンクリートの加熱冷却後の残存圧縮強度に関する研究例は少ない。加えて、一定軸力を受ける RC 柱は、帯筋によってコア部コンクリートの圧縮強度、および変形性能が大きく変化することは一般的に知られているものの、加熱冷却後における帯筋の拘束効果

に関する研究例も少ない。

帯筋によって拘束されたコンクリートの応力-ひずみ関係については、現在まで国内外で多数の研究成果があり、Park ら³⁾、Sheikh ら⁴⁾⁵⁾、六車ら⁶⁾、Mander ら⁷⁾⁸⁾、Hoshikuma ら⁹⁾などによって、モデル式が提案されている。これらの研究は一軸圧縮試験からコンクリート応力-ひずみ関係を求めたものであり、荷重の除荷・再載荷による影響を定式化したものもみられる。

このうち Park らは、コンクリート圧縮強度までは二次曲線、軟化域は拘束程度に応じた勾配を有する直線でピーク応力の 20%まで下降させ、以降は一定応力を保つものと定義した Kent & Park 式³⁾を提案している。また、横補強筋による拘束による圧縮強度の増加を考慮できる修正 Kent & Park 式¹⁰⁾も提案しており、シリンダー強度を用いたコンクリート最大圧縮強度の算定が可能である。

しかしながら、加熱冷却後における帯筋の拘束効果については研究成果が少ないのが現状であり、火災後の RC 部材において、コンクリートの強度低下による残存構造性能を推定することは困難であると考えられる。

本研究は、普通コンクリートを用いた RC 柱を対象として、地震火災を想定した RC 柱部材実験を実施する。

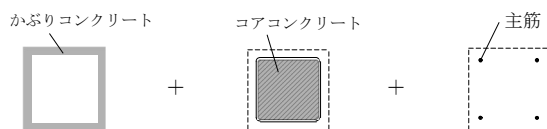
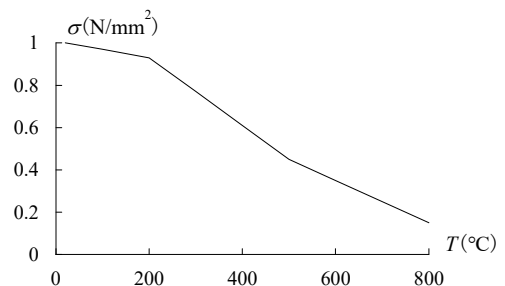


図-1 断面構成

図-2 加熱冷却後のコンクリートの残存圧縮強度²⁾

*1 日本建築総合試験所 (正会員)

*2 大阪工業大学 教授 (正会員)

*3 大阪工業大学 客員教授 (正会員)

その後、要素実験に基づいて、帯筋による拘束効果を考慮できる加熱冷却後のコンクリート残存圧縮強度の推定式の構築を試み、地震火災後の RC 柱の残存軸圧縮耐力の推定法を確立することを目的とする。

2. 地震火災を想定した RC 柱の残存軸圧縮耐力

2.1 実験計画

2.1.1 実験変数

著者らの既往の研究の結果より、地震被災時の最大部材変形角 $R_{ad}=1/200\text{rad}$ 程度の被災度であれば、加熱冷却後の RC 柱の残存軸圧縮耐力に及ぼす影響は小さいと考えられる。そのため本研究では、地震被災によって RC 柱の引張側の主筋が引張降伏する場合を想定し、その直後に火災を受ける RC 柱の軸圧縮耐力実験を行う。表 1 に実験変数を示す。実験変数は、軸力比 n 、帯筋比 p_w および経験最高温度 T であり、これらを組み合わせた計 10 体の試験体が計画された。コンクリートの最大骨材寸法は直径 15mm、水セメント比は 59%、細骨材率は 46.9% とした。また、引張鉄筋比は 0.72% である。帯筋比 p_w は 0.2 および 0.4%、経験最高温度 T は 400℃ および 600℃ である。なお、0-2-0 および 0-4-0 試験体は、非加熱(常温 T_0)とする基準試験体である。各試験体とも、地震被災時の最大部材変形角 R_{ad} は、引張鉄筋が初期降伏に至ると予想される $R_{ad}=\pm 1/100\text{ rad}$ とする。なお、軸力比 n は 0、0.2 である。

2.1.2 実験方法

図 3 に実験方法の概要を示す。実験方法は、以下の通りである。

- (1) 軸方向力を負荷しない加熱前水平加力を実施する(図 3(a)、除荷後の残留部材変形角 $-AR_{ad}$)。
- (2) 所定の軸方向力 cN を試験体に負荷した後、試験体の中央部に設置された熱電対による計測温度が所定の温度に達するまで一定加熱を行う。その後、内部温度を均一とするために 30 分間その温度を維持した後、

自然冷却する。(図 3(b))。加熱速度は、標準加熱曲線(ISO834)の初期勾配を再現するために 1 分間に 50℃ 温度上昇する加熱速度によって一定加熱を実施する。なお、試験体中央部の内部温度が常温 T_0 時に自然冷却されるまで軸方向力 cN を維持する。

- (3) 単調軸圧縮実験を行う(図 3(c))。

図 4 に試験体詳細を示す。試験体は断面が 250×250 mm の RC 柱を想定し、高さ 475mm を試験区間とするスタブ付きの片持ち柱形状である。主筋(SD295A)は 8-D13、帯筋(SD295A)は D6@120 ($p_w=0.20\%$) および @60 ($p_w=0.40\%$) である。加熱試験における試験体内部の温度計測

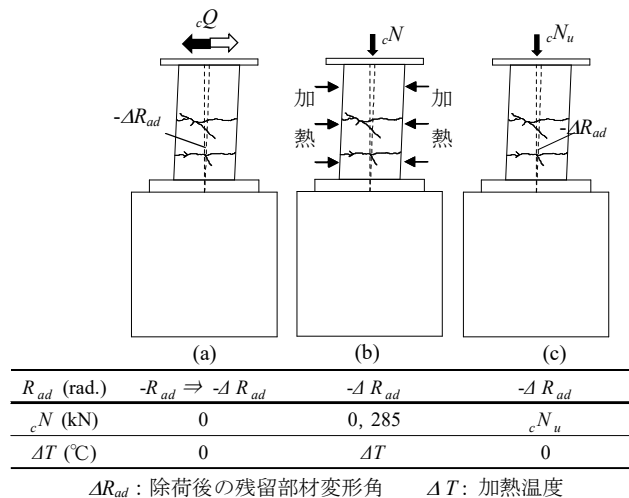


図 3 実験方法

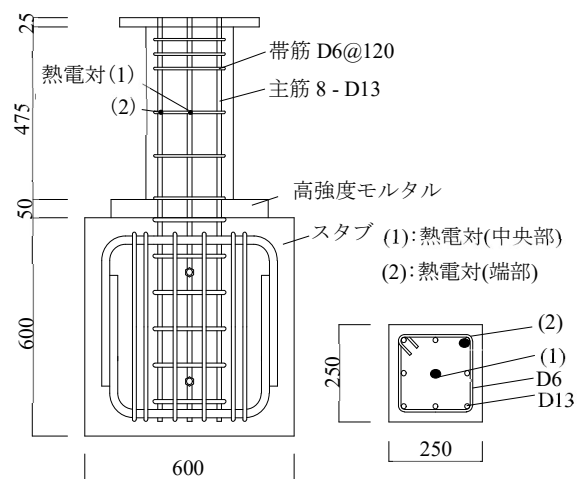


図 4 試験体詳細(寸法単位: mm)

表 1 実験変数

試験体	軸力比 n	帯筋比 p_w (%)	経験最高温度 T (°C)	被災想定部材 変形角 R (rad.)
0-2-0	0	0.2	T_0	1/100
0-2-4	0	0.2	400	
0-2-6	0	0.2	600	
0-4-0	0	0.4	T_0	
0-4-4	0	0.4	400	
0-4-6	0	0.4	600	
2-2-4	0.2	0.2	400	
2-2-6	0.2	0.2	600	
2-4-4	0.2	0.4	400	
2-4-6	0.2	0.4	600	

【試験体名】

0-2-0 — 0: $T=T_0$, 4: $T=400^\circ\text{C}$, 6: $T=600^\circ\text{C}$ ($i/100$ [°C])

— 2: $p_w=0.2\%$, 4: $p_w=0.4\%$ ($i/10$ [%])

— 0: $n=0$, 2: $n=0.2$ ($i/10$)

表 2 使用材料の力学的特性(常温時)

材料	N/mm ²	ヤング係数 E_s	降伏強度 σ_y	引張強度 σ_u
帯筋 D6 (SD295A)		1.72×10^5	382.3	533.3
主筋 D13 (SD295A)		1.55×10^5	346.8	495.2
材料	N/mm ²	ヤング係数 E_c	圧縮強度 σ_{B0}	割裂強度 F_t
コンクリート		1.81×10^4	22.8	2.18

は、図中に示す熱電対(1)・(2)によって行う。なお、試験区間に大型電気炉を設置するために、試験体の柱脚部は厚さ 50mm の高強度モルタル(圧縮強度: 62.6 N/mm²)が打設されている。表-2 に使用材料の常温時の力学的特性を示す。

2.2 実験結果

2.2.1 加熱前水平加力実験および加熱実験

加熱前加力実験は、載荷履歴を部材変形角 $R = \pm(1/200, 1/100)$ rad. とする正負漸増載荷を行う計画であったが、後述する図-6(b)に示すように、 $R = -1/100$ rad. 後の残留平均ひび割れ幅が $R = -1/200$ rad. 時と相違がみられなかったことから、 $R = \pm 1/75$ rad. まで加力を継続した。図-5 に 0-2-6 試験体を代表して加熱前加力実験の結果を示す。履歴曲線の縦軸は試験体に負荷された水平力 cQ 、横軸は部材変形角 R である。また、図-6 に帯筋比 $p_w = 0.2\%$ とする全試験体の負荷荷時における平均ひび割れ幅および平均残留ひび割れ幅の推移を示す。縦軸は平均最大ひび割れ幅 Δw_{cr} および平均残留ひび割れ幅 Δadw_{cr} 、横軸は部材変形角 R である。図中の①・②は、図-6(b)に示す曲げひび割れに対応している。なお、曲げひび割れ幅の測定は、クラックスケールを用いて計測し、柱頭・柱脚部に発生した曲げひび割れ①、②それぞれの4方向の測定値の平均とした。その結果、 $R = -1/75$ rad. 後の平均残留ひび割れ幅は、およそ 0.04 mm 程度であった。さら

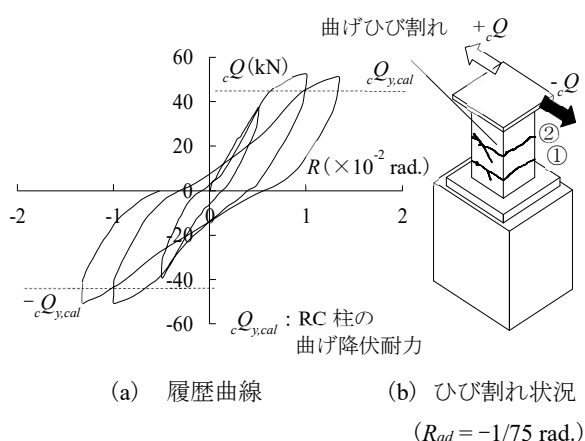


図-5 加熱前加力実験の結果

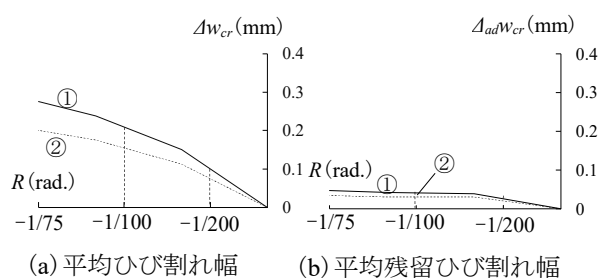


図-6 負荷荷時の最大平均ひび割れ幅および平均残留ひび割れ幅の推移 ($p_w = 0.20\%$)

に、 $R = -1/200$ rad. および $R = -1/75$ rad. 後の平均残留ひび割れ幅については、①、②いずれにおいても相違はみられなかったことから、引張鉄筋が初期降伏する程度の被災を受けた RC 柱であっても、平均残留ひび割れ幅が加熱冷却後の残存軸圧縮耐力に及ぼす影響は、既往の研究における引張鉄筋が弾性内にある場合と同様に小さいと考えられる。

加熱実験の結果、軸方向力 cN の有無にかかわらず、加熱冷却後の RC 柱のコンクリート表面には、加熱による微細なひび割れが数多く確認された。一方、加熱冷却後における①・②の残留ひび割れ幅は、加熱前に比べて小さくなった。

2.2.2 水平加力および加熱後の軸方向圧縮実験

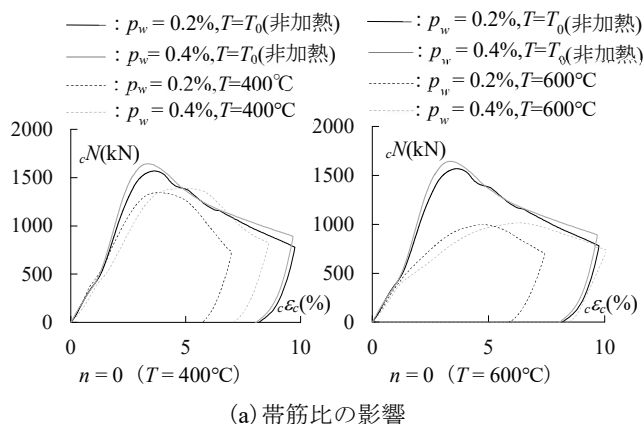
図-7 に単調軸圧縮実験の結果を示す。縦軸は試験体に負荷された軸方向力 cN 、横軸は圧縮ひずみ度 $c\epsilon_c$ である。 $T = 400^\circ\text{C}$ および 600°C の加熱を受けた試験体の最大耐力は、非加熱試験体に対して 15% および 40% 程度低下した。また、各経験最高温度 T において $n = 0$ に対する $n = 0.2$ の最大耐力は、約 10% 程度大きくなったが、 $p_w = 0.2\%$ に対する $p_w = 0.4\%$ の最大耐力について顕著な差はみられなかった。

3. 加熱冷却後のコンクリート残存圧縮強度の推定

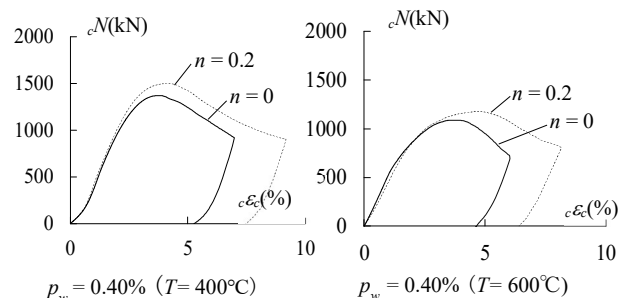
3.1 実験計画

3.1.1 実験変数

図-8 に供試体詳細を示す。供試体は、帯筋の中心間



(a) 帯筋比の影響



(b) 軸力比の影響

図-7 cN - $c\epsilon_c$ 関係

距離 $b_e \times D_e = 194 \times 194 \text{ mm}$ 、高さ 360 mm を試験区間とするかぶりのない RC 部材である。組立筋は 4-D6 (SD295A)、帯筋は D6 (SD295A) とする。コンクリートの使用材料は、粗骨材の最大寸法が 15 mm となるように調合しており、供試体は気中養生とした。実験変数は、加熱冷却中に負荷される軸力比 (以下、軸力比という) n 、帯筋比 p_w および経験最高温度 T である。経験最高温度 T は 200°C 、 400°C および 600°C とし、帯筋比 p_w は 0 、 0.2% (D6@120) および 0.4% (D6@60)、軸力比 n は 0 、 0.15 および 0.3 とした 27 体に加えて、各帯筋比に 1 体の非加熱の基準供試体を含む計 30 体が計画された。表-3 に使用材料の常温時の力学的特性を示す。

3.1.2 実験方法

1) 加熱試験

全供試体とも、コンクリート表面の含水率が $2 \sim 3\%$ 程度の平衡状態を確認した後、加熱試験を実施した。加熱試験は、供試体に所定の軸方向力 cN を供試体に負荷した後、図-9(i) に示すような加熱温度曲線にしたがって、供試体の中央部に設置された熱電対 (図-8 参照) による計測温度が所定の温度に達するまで、大型電気炉により一定加熱を行う。加熱速度は全ての供試体において $50^\circ\text{C}/\text{min}$ としたが、図-9(ii) の加熱試験結果に示すように、コンクリート内部温度は設定した加熱曲線と比較して、緩やかな温度勾配を示す結果に至っている。その後、内部温度を均一にするために 30 分間その温度を維持した後、軸方向力 cN を維持したまま自然冷却する。

2) 単調軸圧縮実験

単調軸圧縮実験は、加熱冷却 10 日前後に実施し、組立筋による効果を除去するために、組立筋の位置に孔を設

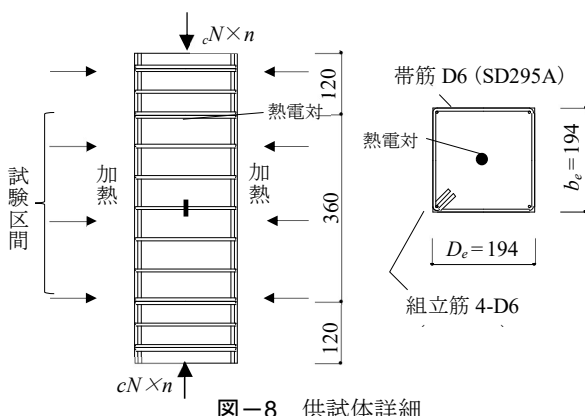


図-8 供試体詳細

表-3 使用材料の力学的特性 (常温時)

材料	N/mm ²	ヤング係数 E_c	圧縮強度 f'_c	割裂強度 F_t
コンクリート		1.86×10^4	22.6	2.88
材料	N/mm ²	ヤング係数 E_s	降伏強度 σ_y	引張強度 σ_u
組立筋 D6 (SD295A)		2.23×10^5	341	507
帯筋 D6 (SD295A)		2.24×10^5	391	542

けた載荷板を介して、コンクリート断面にのみ圧縮力を負荷する。

3.2 実験結果とその考察

図-10 に加熱冷却後の供試体の残存圧縮強度と経験最高温度の関係を示す。縦軸は非加熱時のシリンダー圧縮強度 σ_{B0} に対する加熱冷却後における供試体の残存圧縮強度 σ_{BF} の比 $k_0 = \sigma_{BF} / \sigma_{B0}$ (以下、強度比という)、横軸は経験最高温度 T である。 T が高くなるにつれて強度比 k_0 は低下するが、 $T = 400^\circ\text{C}$ を超えると強度比 k_0 の低下率は増大しており、 $T = 400^\circ\text{C}$ 時に折れ点が認められる。これは、加熱を受けたコンクリート圧縮強度やヤング係数などの力学的特性が低下し、特に 400°C を超えるとその低下が著しく現れること¹¹⁾、その要因として高温下でのセメント硬化体と骨材の収縮挙動の違いや、セメント水和物のうち、水酸化カルシウムの脱水に伴う化学変化により水和組織の強度が低下すること¹²⁾などが考えられる。図-10(i) (a) より、帯筋比 p_w の増加に伴って強度比 k_0 は大きくなる傾向を示すが、各帯筋比に対して、 $T = 200^\circ\text{C}$ までは軸力比 n による強度比 k_0 の相違は見られない。一方、 $p_w = 0.2\%$ の場合は $T = 200^\circ\text{C}$ 、 $p_w = 0.4\%$ の場合は $T = 400^\circ\text{C}$ を超えると、軸力比 n に伴って強度比 k_0 は若干ではあるが大きくなる傾向がみられる。

3.3 帯筋による拘束効果を考慮できる加熱冷却後のコンクリート残存圧縮強度の評価

本実験結果に基づいて、加熱冷却後のコンクリート残存圧縮強度のモデル化を試みた。コンクリート残存圧縮強度の推定式については、拘束効果の程度を加味できる修正 Kent & Park 式¹⁰⁾を用いるものとした。図-11 は、本実験結果に基づいて、経験最高温度 T と軸力比 n が加熱冷却後の無拘束下のコンクリート残存圧縮強度 σ_{BF} に及ぼす影響を示したものである。図-11 (a) は、帯筋比 $p_w = 0$ 、軸力比 $n = 0$ とした実験結果に基づいて、経験最高温度による強度比 k_0 と経験最高温度 T の関係を示している。実験結果を近似して算出された強度比 k_0 は、式(1)によって推定できる。

$$k_0 = -0.00067T + 1.012 \quad (\text{常温} \leq T < 400^\circ\text{C}) \quad (1)$$

$$= -0.0013T + 1.262 \quad (400^\circ\text{C} \leq T \leq 600^\circ\text{C})$$

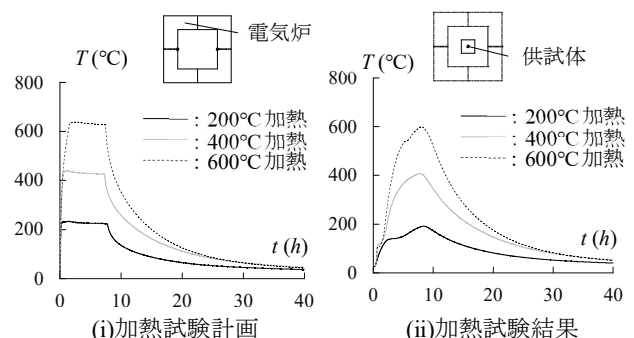


図-9 加熱試験方法

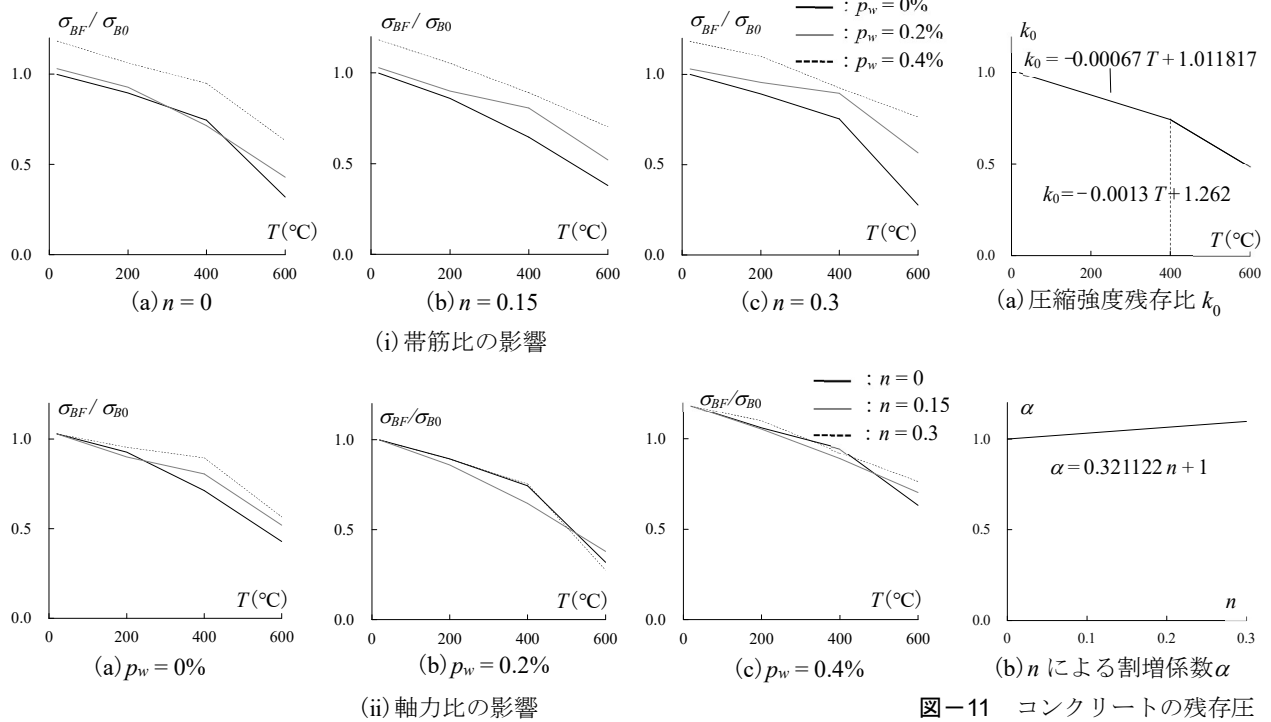


図-10 残存圧縮強度と経験最高温度の関係

図-11 コンクリートの残存圧縮強度比モデル

図-11 (b)は、軸力比 n による割増係数 α と軸力比 n の関係を示しており、 α は、各供試体の残存圧縮強度 σ_{BF} を帯筋比 p_w と経験最高温度 T が同一な $n=0$ の供試体の残存圧縮強度 σ_{BF} によって除した値を近似することによって求めた(式(2))。帯筋による拘束を受ける場合のコンクリートの残存圧縮強度 σ_{PF} は、帯筋による拘束を受ける非加熱時のコンクリート最大圧縮強度の推定式⁴⁾に図-11 (a), (b)の結果(式(1)および式(2))を適用し、式(3)により推定できる。

$$\alpha = 0.3211n + 1 \quad (0 \leq n \leq 0.3) \quad (2)$$

$$\sigma_{PF} = \alpha(k_0 \cdot \sigma_{B0} + \kappa \cdot \rho_{wh} \cdot \sigma_{wy}) \quad (3)$$

$$\kappa = 11.5(d_w/c) \cdot \{1 - 0.5(s/cD)\}$$

$$\rho_{wh} = V_0 / (cb \cdot cD \cdot s)$$

【記号】 ρ_{wh} : 帯筋のコア体積比、 κ : 帯筋による強度比、 σ_{wy} : 帯筋の降伏点、 c : 帯筋の有効支持長さ、 s : 帯筋の間隔、 d_w : 帯筋の公称径、 V_0 : 1組の帯筋の体積、 b, cD : 柱断面の幅およびせい、その他は本文の通り。

ただし、適用可能な帯筋比 p_w の範囲は、本実験で実施された $0 \leq p_w \leq 0.4\%$ とする。また、帯筋の降伏点は、加熱冷却後に回復することが知られていることから¹³⁾、常温時の降伏点を用いている。

3.4 地震火災後のRC柱に対する提案式の適用

表-4は、RC柱の単調軸圧縮実験の実験値を用いて、式(3)から算出された加熱冷却後におけるRC柱の残存軸圧縮耐力の計算値(以下、計算値という)の妥当性を検証したものである。加熱冷却後のRC柱の計算値は、図-1に示すように、かぶり部およびコア部のコンクリート残存軸圧縮耐力と主筋の圧縮耐力を累加することに

よって算定した。コア部のコンクリート残存軸圧縮耐力は、式(3)によって算出された残存圧縮強度にコア部のコンクリートの断面積を乗じて求めた。一方、かぶり部のコンクリートの残存軸圧縮耐力は、コンクリート残存圧縮強度を式(3)の右辺第2項を0として算出し、かぶり部のコンクリートの断面積を乗じて求めた。また、主筋の降伏点および引張強度は、加熱冷却後に回復することが知られていることから¹³⁾、主筋の残存軸圧縮耐力は、常温時の降伏点に主筋の全断面積を乗じて求めた。なお、本実験の範囲において、残留ひび割れ幅が加熱冷却後のRC柱の残存軸圧縮耐力に及ぼす影響は小さいと考えられることから、残留ひび割れ幅の影響は無視できるものとし、地震を伴わない火災単体の被災を受けるRC柱と同義として算定を試みた。

単調軸圧縮実験結果に関する計算値に対する実験値の比は1.03、変動係数0.0707であり、2-2-6試験体および2-4-6試験体の実験値に対してはやや過小評価している。また非加熱の試験体である0-2-0、0-4-0試験体については、計算値は実験値を若干過大評価しているが、本提案式を用いることで非加熱および加熱試験体についておおよそ精度良く評価することができている。

4. まとめ

帯筋の拘束効果を考慮できる加熱冷却後の普通コンクリートの残存圧縮強度推定式を提案し、推定式の妥当性を検討するために、地震火災を想定したRC柱の残存軸圧縮耐力を検討した結果を以下に示す。

表-4 加熱後の残存軸圧縮耐力

試験体	ϵN_u (kN)		実/計
	実験値	計算値	
0-2-0	1568.6	1722.0	0.91
0-2-4	1345.6	1347.1	1.00
0-2-6	998.8	929.7	1.07
0-4-0	1644.6	1755.1	0.94
0-4-4	1390.9	1381.0	1.01
0-4-6	1014.7	963.6	1.05
2-2-4	1367.7	1365.3	1.00
2-2-6	1088.2	974.6	1.12
2-4-4	1498.8	1401.3	1.07
2-4-6	1172.8	1010.7	1.16

- 1) 本研究の範囲では、想定した被災想定部材変形角 $R \leq 1/75\text{rad}$ では、引張主筋が初期降伏する場合であっても残留ひび割れ幅は非常に小さく、地震被災が加熱冷却後の RC 柱の残存軸圧縮耐力に及ぼす影響は小さい。
- 2) 要素実験に基づいて、加熱時に負荷される軸力比、経験最高温度および帯筋による拘束効果の影響を因子とする加熱冷却後のコンクリート残存圧縮強度の推定式を提案した。
- 3) 地震火災後の RC 柱の残存軸圧縮耐力について、火災単体の被災を受けた RC 柱と同義とした結果、断面を構成する各部位の残存軸圧縮耐力を提案式に基づいて算定し、それらを累加することによって、実験値を精度良く評価することができる。

ここで、既往の研究¹⁴⁾¹⁵⁾ではコンクリートの粗骨材寸法が加熱冷却後のコンクリートの圧縮強度、ヤング係数、圧縮強度時ひずみといった力学的特性に影響を及ぼすことが明らかにされており、本推定式に対しても粗骨材の最大寸法の影響を考慮する必要がある。本研究では粗骨材の最大寸法を直径 15mm とした部材実験および要素試験を実施していることから、今後、一般の建築構造物に用いられる粗骨材最大寸法が直径 20mm の場合について、本推定式の適用性等を検討する必要がある。また、本研究では部材実験および要素試験において、加熱後 10 日前後の冷却期間を経たコンクリートの残存圧縮強度を検討している。しかしながら、既往の研究¹⁶⁾によると、コンクリート残存圧縮強度の回復率は、受熱温度、冷却方法および冷却期間の影響を受けることが明らかにされている。したがって、コンクリート残存圧縮強度が平衡状態となるための受熱温度に応じた冷却期間を定量的に評価する必要がある。

参考文献

- 1) 吉田正友ほか：地震火災に対する鉄筋コンクリート柱の保有耐火性能及び残存構造性能 その 1 残存軸圧縮耐力，日本建築学会大会学術講演梗概集 防火 pp.335-336，2018.9
- 2) 日本建築学会：構造材料の耐火性ガイドブック，pp.31-

32，2017

- 3) Kent,D.C. and Park,R. : Flexural Members with Confined Concrete, *J.Struct.Div.*, ASCE, Vol.97,No.7,pp.1969-1990,1971.
- 4) Sheikh,S.A. and Uzumeri,S.M. : Strength and Ductility of Tied Concrete Columns, *J.Struct.Div.*, ASCE, Vol.106, No.ST5,pp.1079-1102,1980.
- 5) Sheikh,S.A. and Uzumeri,S.M. : Strength and Ductility of Tied Concrete Columns, *J.Struct.Div.*, ASCE, Vol.106,No.ST5,pp.2703-2722,1982.
- 6) 六車熙，渡辺史夫，勝田庄二，田中仁史：横拘束コンクリートの応力ひずみ曲線のモデル化，セメント技術年報，Vol.34，pp.429-432，1980.
- 7) Mander,J.B., Priestley,M.J.N. and Park,R : Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete, *J..Struct.Engrg.*,ASCE, Vol.114, No.8, pp. 1804-1826,1988.
- 8) Mander,J.B., Priestley,M.J.N. and Park,R : Observed Stress-Strain behavior of Confined Concrete, *J..Struct.Engrg.*,ASCE, Vol.114, No.8, pp. 1827-1849,1988.
- 9) Hoshikuma, J., Kawashima,K., Nagaya,K. and Taylor,A.W : Stress-Strain Model for Confined Reinforced Concrete in Beidge piers, *J..Struct.Engrg.*,ASCE, Vol.123, No.5, pp. 624-633,1997.
- 10) Park,R., Priestley,M.J.N., and Gill,W.D. : Ductility of Square-Confined Concrete Columns, *Journal of the Structural Division* , ASCE, Vol.108, No.ST4, Proc. Paper17024, Apr., 1982, pp.929-950
- 11) U.Schneider 著(森永繁他訳)：コンクリートの熱的性質，技報堂，1983 年
- 12) S.K.Handoo, Physicochemical, mineralogical , and morphological characteristics of concrete exposed to elevated temperature, *Cement and concrete Research* 32, 2002, pp1009-1018
- 13) 日本鋼構造協会 技術委員会 耐久性分科会 耐火小委員会高温強度班：特集 鉄筋コンクリート用棒鋼および PC 鋼棒・鋼線の高温時ならびに加熱後の機械的性質 JSSC,Vol.5,No.45,pp.1-62,1969
- 14) 平島岳夫，常世田昌寿，豊田康二，山下平祐，篠原幸一，上杉英樹：高温加熱を受けるコンクリートの力学的特性に関する実験結果の比較—使用材料・調合の影響について—，日本建築学会大会学術講演梗概集，A-2 分冊，pp.135-138，2003.9
- 15) U.シュナイダー著，森永繁，山崎庸行・林章二訳：コンクリートの熱的性質，技報堂，1983.12
- 16) 李柱国，李慶濤：高温加熱を受けたコンクリートの性能回復に関する研究，日本建築学会構造系論文集，Vol.76, No.666, pp.1375-1382，2011.8