# 論文 火災加熱を受ける鉄筋コンクリート柱の解析精度と影響因子に関す る研究

笠原 貴喜\*1·田嶋 和樹\*2·長沼 一洋\*3

要旨:鉄筋コンクリート柱の載荷加熱実験が行われた試験体14体に対して,既往の温度依存性を用いて有限 要素法による解析を行い,柱の断面内温度分布や軸方向ひずみの進展状況を実験と比較した。その結果,柱 が軸崩壊に至るまでの挙動を解析でも再現できたが,解析精度には様々な因子が影響を与え,特にコンクリ ートのヤング係数の温度依存性と熱伝導解析の精度が解析結果に大きな影響を与えることが分かった。

キーワード:熱伝導解析,応力解析,載荷加熱実験,有限要素法

## 1. はじめに

柱の耐火性能試験では最大軸方向収縮量が柱長さの 1/100以下でなければならないとの規定があるように, 柱の軸方向挙動は火災時における建築物の安全性確保 の上で重要である。火災時を想定した鉄筋コンクリー ト(以下 RC)柱の解析では,コンクリートと鉄筋の 材料特性の温度依存性を考慮する必要があるが,それ らの特性はコンクリートや鋼材の種類と実験条件によ ってばらつきが大きいのが現状である。そのため,火 災時における RC 柱の挙動を解析で予測する際の条件 設定が難しいと言える。

本研究では「構造材料の耐火性ガイドブック」<sup>1)</sup>に 示されている材料特性の温度依存性を用いて,既往の RC 柱の載荷加熱実験を対象とした解析を行い,解析 による予測精度と,精度に影響を及ぼす因子を明らか にすることを目的とした。

# 2. 解析対象とした実験

既往の5つのシリーズの載荷加熱実験<sup>2)~7)</sup>より,**表** -1に示す爆裂を生じていない試験体 14 体を解析対 象とした。いずれの実験も ISO834 標準加熱曲線に従 って加熱が行われているが,文献 2),3)および 6)では加 熱後に軸力を保持したまま,自然冷却が行われている。

### 3. 解析モデル

対称性を利用して柱の断面方向の 1/2 を三次元でモ デル化した。コンクリートは六面体要素,鉄筋はトラ ス要素で置換し,主筋とコンクリートの間には付着す べりを考慮する接合要素を挿入した。高さ方向の分割 は帯筋の間隔に合わせた。例として図-1 に C08N30 試験体の要素分割図を示す。

\*1 日本大学大学院 理工学研究科建築学専攻 (学生会員)\*2 日本大学 理工学部建築学科准教授・博士 (工学) (正会員)\*3 日本大学 理工学部建築学科教授・博士 (工学) (正会員)

表-1	解析対	象試験	体

文献		柱幅	σв	ᇔᆂᄔ	
番号	<b></b> 訊 陳 仲 名	(mm)	(N/mm <sup>2</sup> )	軸刀比	
2) 3)	C08N30		77.0	0.300	
	C12P20	400	147.0	0.270	
	C15P20		170.0	0.290	
	C15P30	1	165.0	0.340	
4)	Fc060-10	400	82.7	0.242	
	Fc100-10		113.2	0.294	
	Fc130-30	350	154.3	0.259	
	Fc150-30	1	174.3	0.229	
5)	C80L100	400	104.8	0.254	
6)	R80J33V1	400	106.0	0.250	
	R100J33P2	400	118.0	0.280	
	R150J33P1	400	157.0	0.320	
7)	L80S	400	115.0	0.240	
	H80S	400	112.0	0.340	



### 4. 柱内部の温度分布の解析精度

# 4.1 熱伝導解析手法

熱応力解析に用いる温度の時刻歴を得るため,まず 非定常熱伝導解析を行った。非定常熱伝導方程式の解 法には Crank-Nicolson の差分式を用い,収束計算には Newton-Raphson 法を用いた。加熱条件は実験と同様に ISO834 標準加熱曲線を用いた。また,自然冷却時に与 える温度は文献 2) と 3)に記載されている炉内温度と 一致するよう設定した。

コンクリートの熱物性値は, Eurocode4<sup>8)</sup>の式を比熱 については 1.2 倍, 熱伝導率については 0.8 倍した斎藤 ら<sup>9)</sup>の提案値を用いた。コンクリートの重量含水率に は論文中に記載されている値を用いており, 記載がな いものについては 5%と仮定して蒸発潜熱を考慮した。 水分の移動については考慮していない。鉄筋の熱物性 値には Eurocode4<sup>8)</sup>の式を用いた。

解析では柱の加熱区間の表面に熱放射境界を設定し, 対流熱伝達も考慮した。火炎の放射率 Rf は 0.9, コン クリート表面の放射率 Rs は 0.9 と仮定し, 合成放射率 R は次式により求めた。

R = 1.0 / (1.0 / Rs + 1.0 / Rf – 1.0) (1) 対流熱伝達率は 23.0 W/m<sup>2</sup>/K とし,加熱区間以外の 部分は断熱境界とした。

#### 4.2 熱伝導解析結果

図-2に CO8N30 と Fc060-10 の断面内の温度分布の 推移を示す。比較のため、蒸発潜熱を考慮しない解析 の結果も併記している。いずれの解析も時間の経過に 伴う温度上昇と断面中心への伝熱状況を比較的良好に 再現している。なお、表面に近い部分では蒸発潜熱の 考慮の有無による違いは小さく、断面の中心に近い領 域では蒸発潜熱を考慮しないと温度が実験より高くな る傾向が確認できる。他の試験体も同様の傾向を示し た。また図-3 に R80J33V1 の温度分布図を示す。

### 5. 柱の軸方向ひずみの解析精度

#### 5.1 応力解析手法

前述の熱伝導解析結果で得られた温度を用いて応力 解析を行う。コンクリートの力学特性の温度依存性は 文献1)の提案値を用いた。一部の解析では,文献1) に記載されているコンクリートの圧縮強度が 72.7~ 92.7N/mm<sup>2</sup>の熱間圧縮実験を行った論文に示されてい る温度依存性より,その上限値と下限値を用いた。線 膨張係数は Eurocode2<sup>10</sup>の石灰岩式とけい岩式を使用 している。これらの温度依存性を図-4 に示す。

過渡ひずみは式(2)に示す Anderberg らの式<sup>11)</sup>に従っ て考慮するものとした。

$$\varepsilon_{tr} = -k2 \cdot \sigma / \sigma_{u,0} \cdot \varepsilon_{th}$$

(2)

ここで、 $\epsilon_{tr}$ は過渡ひずみ、 $\epsilon_{th}$ は自由熱ひずみ、 $\sigma$ は 圧縮応力、 $\sigma_{u,0}$ は常温時における圧縮強度、k2は過渡 ひずみ係数で、コンクリートの圧縮強度の関数とした 式(3)により設定した。

 $k2 = 0.039 \sigma_B + 0.319$ 

(3)

式(3)は図-5に示す実験データ<sup>11)~16</sup>の直線回帰式で ある。なお、文献 15)の  $\sigma_B=38N/mm^2$ は、他のデータと 比べると加熱速度が二倍程度速く、過渡ひずみ係数が 極端に大きな値を示しているため除外した。また、式 の算定に使用したコンクリートの  $\sigma_B$  は今回の解析対 象にある超高強度を含んでおらず、今後のデータの蓄 積が必要である。

クリープひずみについては、コンクリートの調合に よって発生量が異なるため本解析では考慮していない。

鉄筋の降伏強度とヤング係数の温度依存性には,長 尾らの実験<sup>17)</sup>と丹羽らの実験<sup>18)</sup>を参考に図-6に示す ように設定した。高温引張試験のデータが見当たらな かった KSS785 と SHD685, USD785 については, USD685 の温度依存性を適用した。線膨張係数は Eurocode2<sup>10)</sup>の式を用いた。

コンクリートと鉄筋間の付着強度の温度依存性には、
 Bednarek らの実験<sup>19)</sup>を参考に設定した。

各温度依存性で各図に示した以上の温度では、図中 の最高温度時の値を設定した。







## 図-6 鉄筋の温度依存性

#### 5.2 応力解析結果

図-7 に軸方向ひずみ-加熱時間関係の実験と解析 の比較を示す。軸方向ひずみは柱高さでの平均ひずみ である。ほとんどの試験体で加熱開始から60~120分 までの柱軸方向ひずみを圧縮方向に大きめに評価した。 この理由の一つとして、豊田ら20が述べているように、 100℃以下では過渡ひずみを考慮しない方が変位拘束 した加熱実験結果を良好に再現できることが関係して いると思われる。100℃までの過渡ひずみを考慮しない 場合、コンクリートの圧縮方向ひずみが減少すること から,解析での加熱開始から60~120分までの軸方向 ひずみが実験結果に近づくと考えられる。しかし、過 渡ひずみ係数を算出している既往の多くの研究では 100℃以下の過渡ひずみも含めた上で過渡ひずみ係数 を算出しているため、100℃以上を対象とした過渡ひず み係数を算出することは現時点では難しい。熱伝導解 析におけるコンクリートの過渡ひずみ係数の設定には 注意が必要であると言える。

加熱開始から120分以降の軸方向ひずみは、解析の 方が実験よりも小さいものと大きいものがあるが、セ メントや骨材の種類、圧縮強度、ポリプロピレン繊維 混入量などによって実験と解析の対応状況には顕著な 傾向は見られなかった。しかし、同一の調合のコンク リートを用いた試験体では、実験と解析の傾向がほぼ 同様となり、C15P20 と C15P35、C060-10 と Fc100-10 は実験よりひずみが大きくなり, C130-30 と Fc150-30, L80SとH80Sは実験とのひずみの差が小さかった。こ のように同一の調合のコンクリートを用いた場合、実 験と解析で同様の傾向が見られた原因として、解析で 用いたコンクリートの温度依存性に一貫して文献 1) の推奨値を用いていることが挙げられる。文献 1)の 推奨値の元データである 55 の供試体の内, 27 の供試 体で硬質砂岩とポルトランドセメントが用いられてい るため、推奨値は硬質砂岩とポルトランドセメントを 使用したコンクリートの特徴が強く反映されていると 考えられる。また 55 体の内、ポルトランドセメント以 外のセメントが用いられている供試体は9体のみであ る。それに対し, RC 柱の試験体には石灰岩や花崗岩, 低熱ポルトランドセメントや中庸熱ポルトランドセメ ントなど様々な材料が用いられているため、コンクリ ートの調合によって実験結果と解析結果の整合性に異 なる傾向が現れたものと考えられる。さらに、コンク リートの線膨張係数は骨材の種類に大きく左右される ため、Eurocode2<sup>10</sup>の2つの式のみでは解析精度に限界 があると思われる。



#### 5.3 解析精度に及ぼす因子の検討

熱伝導解析で精度良く実験結果と対応していた Fc060-10試験体に関して軸方向ひずみの解析精度への 影響因子の検討を行う。図-4 にプロットした点はコ ンクリートの圧縮強度が Fc060-10 試験体に近い (σB =72.7~92.7N/mm<sup>2</sup>)ものの温度依存性のデータを収集 したものであり、それらのデータの範囲内で温度依存 性を変化させることによって、それが柱の軸方向ひず みに与える影響を確認する。

圧縮強度とヤング係数, 圧縮強度時ひずみに図-4 の最大値と下限値を用いた場合、また蒸発潜熱を考慮 しない場合の解析結果を図-8に示す。図-4の温度依 存性の下限値を使用した解析結果より、圧縮強度とヤ ング係数、圧縮強度時ひずみをそれぞれ個別に変化さ せた場合,軸方向ひずみに最も影響を与えているのは ヤング係数であり(図-8(b)), 圧縮強度も少なからず 影響を与えていた。しかし、圧縮強度時ひずみの温度 依存性を変化させても、ほとんど影響は見られなかっ た。また、これらの温度依存性を変化させ、軸方向ひ ずみが最大である場合(圧縮強度とヤング係数は最小 値, 圧縮強度時ひずみは最大値) と最小である場合 (圧 縮強度とヤング係数は最大値、圧縮強度時ひずみは最 小値)を比較したところ、図-8(d)と図-8(e)より加 熱開始から300分経過時における柱のひずみが0.7%ほ ど変動することが分かった。

一方、繊維を混入したコンクリートの熱間圧縮実験 21)22)より、繊維の混入が圧縮強度の温度依存性に与え る影響は少ないが、繊維混入量が 0.075vol%である文 献 21)では、繊維を混入していない場合よりも加熱に よるヤング係数の低下量が小さくなるのに対し、繊維 混入量が 0.26vol% である文献 22) では、繊維を混入し ていない場合よりも加熱によるヤング係数の低下量が 大きくなった。このことから、ポリプロピレン繊維を 混入することによってヤング係数が変化することは明 らかであり、解析精度の向上のためにはポリプロピレ ン繊維を混入したコンクリート供試体の熱間圧縮試験 データの蓄積が必要だと考えられる。また、これらの ことから現在までに行われてきたコンクリートの熱間 圧縮試験より得られた温度依存性をポリプロピレン繊 維が混入した RC 柱の解析に使用すると、ヤング係数 の変化が適切に考慮できず、解析結果が実験と異なる 傾向を示す可能性があると考えられる。

次に Fc060-10 で測定温度に近かった蒸発潜熱を考 慮しない場合の熱伝導解析結果を応力解析に反映した 場合(図-8(f))は,解析の軸崩壊時の軸方向ひずみ が,図-7の解析よりも0.3%ほど圧縮方向に増加した。 熱伝導解析の温度差が100℃ほどであっても応力解析 の結果に大きな影響を与えることから,熱伝導解析の 精度も柱の軸方向ひずみを予測する上で非常に重要な 因子であると考えられる。



## 6. まとめ

14 体の RC 柱の載荷加熱実験を対象として熱伝導解析 と応力解析を行い,柱の軸方向ひずみの予測精度と影響 因子に関して検討を行い,以下の知見を得た。

- 加熱初期の軸方向ひずみは解析の方が実験より大 きく、その原因として100℃以下の過渡ひずみを大き く見込んでいる可能性がある。
- 2)既往の材料特性の温度依存性を用いると実験との 対応性には差異が見られ、特にコンクリートの種類 や使用骨材、ポリプロピレン繊維の混入量の違い等 が影響を及ぼしていると考えられる。
- 3) 熱伝導解析による柱中心の温度が100℃ほど違った ことで、応力解析の結果に大きな影響を与え、部材 の温度を適切に評価することが重要である。

#### 謝辞

本研究の遂行に際し,株式会社大林組技術研究所の丹 羽博則博士にご指導,ご助言を頂きました。ここに深く 謝意を表します。

#### 参考文献

- 構造材料の耐火性ガイドブック,日本建築学会, 2017
- 2) 松戸正士,他:超高強度材料を用いた鉄筋コンクリ ート柱の耐火性に関する研究 その 1~2,日本建築 学会大会,A-2,pp.21-24,2002.8
- 3) 松戸正士,他:超高強度材料を用いた鉄筋コンクリ ート柱の耐火性に関する研究 その9~11,日本建築 学会大会,A-2,pp.75-80,2005.9
- 藤中英生,他:ポリプロピレン繊維を混入した高強 度 RC 柱の耐火性能,日本火災学会論文集,A-2, vol.54, No.1, pp.17-23, 2004
- 5) 木村仁治,他:石灰石粗骨材を用いた高強度鉄筋コ ンクリート柱の耐火性に関する研究 その 3~4,日 本建築学会大会,防火,pp.57-60,2015.9
- 6) 丹羽博則,他:Fc80~180N/mm<sup>2</sup>級 高強度コンクリ ートを用いた RC 柱の耐火性能 その 1~2,日本建 築学会大会,A-2, pp.253-256, 2008.9
- 7) 丹羽博則,他:複合加力を受ける高強度 RC 柱の耐 火性能 その1~2,日本建築学会大会,A-2,pp.87-90, 2010.9
- European Committee for Standardization (CEN): Eurocode 4 - Design of composite steel and concrete structures - Part 1-2: Structural fire design, European Prestandard, CEN, Brussels, Final Draft prENV 1994-1-2, Oct. 1993

- 斎藤秀人,他:中心圧縮を受ける充填鋼管コンクリート柱の内部温度と耐火時間に関する研究,日本建築学会環境系論文集,第582号,pp.9-16,2004.8
- 10) Eurocode2, Design of concrete Structures, Part 1-2, General rules – structural fire design, The European Standard EN 1992-1-2, 2004
- 11) Anderberg, Y. and Thelandersson, S. : Stress and Deformation Characteristics of Concrete at High Temperatures, 2.Experimental Mechanics and Concrete Construction, Lund Institute of Technoligy, Bulletin No.54, Lund, Sweden, 1976
- 12)山下平祐,他:超高強度コンクリートの高温下にお ける力学的特性に関する実験的研究 その4,日本建 築学会大会,pp.75-76,2004.8
- 13) 常世田昌寿,他:普通コンクリートの過渡ひずみに 関する実験的研究 その5,日本建築学会大会,A-2, pp.35-36,2002.8
- 14) 丹羽博則,他:20℃~600℃までの高温載荷加熱を
   受けるコンクリートのひずみ挙動,日本建築学会大
   会,A-2, pp.249-250, 1999.9
- 15)常世田昌寿:石灰岩骨材を用いた普通コンクリートの火災高温時における過渡ひずみに関する実験的研究,建材試験センター建材試験情報 5, pp.27-34,2006
- 16)山下平祐,他:コンクリートの載荷時熱ひずみに関する水分の影響を考慮した数式モデルの検討,日本 建築学会大会,防火,pp.123-126,2016.8
- 17) 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,A-2, pp.75-76, 2000.9
- 18) 丹羽博則,他:鉄筋コンクリート用棒鋼の高温時に おける力学的性質,日本建築学会大会,A-2,pp.11-12, 2006.9
- 19) Z.Bednarek et al.: Testing Steel Concrete Bond in Fire Conditions, Proc. of the 9<sup>th</sup> Int. Conference on Modern Building Materials, Structures and Techniques, Vilnius, Lithuania, No.6, pp.1152-1158, 2007.5
- 20)豊田康二,他:火災加熱を受ける 100N/mm<sup>2</sup>級高強 度コンクリートの過渡ひずみに関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, vol.75, No.648, 453-460, 2010.2
- 21) 崔景喆,他:Jute 繊維及び PP 繊維を混入した高強度 コンクリートの高温特性,日本建築学会,防火, pp.99-100,2013.8
- 22) 右田周平,他:高強度コンクリートの高温時力学的 特性に及ぼすポリプロピレン繊維の影響,日本建築 学会大会,A-2,pp.11-12,2011.8