

論文 超高強度鉄筋コンクリート柱の耐火性に関する研究

菊田 繁美*1

要旨：本研究は、強度が 80~170N/mm² の超高強度コンクリートを用いた鉄筋コンクリート (RC) 柱の耐火性について実験および解析を基に検討したものである。高温加熱を受ける RC 柱ではコンクリートと鉄筋に熱膨張歪, クリープ歪および応力歪, さらにコンクリートには過渡歪が生じる。載荷加熱実験結果を適切に評価できる熱伝導解析と熱応力変形解析を用いてパラメトリック解析を行い, 高温加熱を受ける RC 柱の火災時軸耐力がコンクリートおよび鉄筋の高温強度を用いた累加強度により評価できることを示すものである。

キーワード：超高強度, 鉄筋コンクリート柱, 耐火性, 過渡歪, 累加強度

1. はじめに

建築基準法における耐火構造に関する基準として, 断面が 40cm×40cm 以上で 3cm 以上のかぶりを有する RC 柱部材が 3 時間の耐火性能を有するものとする耐火構造の例示仕様, および劣化深さをを用いて保有耐火時間を計算する耐火性能検証法がある。しかし, 耐火性能検証法は Fc60 を超える超高強度コンクリートに対して適用範囲以外となっている。前報¹⁾において, 超高強度コンクリートに関しては爆裂深さを適切に評価することにより耐火性能を解析的に推定できることを示した。本報では, 超高強度コンクリートを用いた柱の耐火性能評価方法としてコンクリートおよび主筋の高温強度を用いた累加強度の適用性について, 既往の超高強度コンクリートを用いた実験結果^{2, 3)}およびパラメトリック解析を用いて検討したものである。特に, 常温と異なり高温ではコンクリートに熱膨張歪,

過渡歪およびクリープ歪が生じるため, これらの歪が柱の火災時耐力におよぼす影響を明らかにすることが重要である。爆裂については, 機構の解明が研究段階であり, 爆裂の範囲を推定する方法がまだ無いため, 本報においては爆裂を生じなかった柱のみを対象とした。

2. 載荷加熱実験

2.1 試験体

試験体の一覧を表-1, 断面を図-1に示す。対象試験体は 4 体で, コンクリート強度が約 80N/mm², 約 150N/mm², 約 170N/mm²である。全試験体とも断面が 40cm×40cm, 鉄筋の最小かぶり厚さが 4cm の同一の断面であり, 軸力比が 0.27~0.34 の範囲であった。C15N27, C17N29 および C17N34 試験体はポリプロピレン短繊維をコンクリートに混入し爆裂を防止した試験体である。全試験体とも材齢は約 8 ヶ月で, 室内で

表-1 試験体一覧

| 試験体 | 断面 (mm) | コンクリート強度 $c\sigma_{u20}$ (N/mm ²) | 主筋 | | | 帯筋 | | 軸力比 $N/(A_c \cdot c\sigma_{u20})$ | 崩壊時間 (分) | |
|----------|------------|---|--------|-----------|------|-----------|-----------|--------------------------------------|-------------|-------|
| | | | 材種 | Pg (%) | | 材種 | Pw (%) | | | |
| C08N30 | 400×400 | 77.3 | 12-D19 | USD685 | 2.15 | 4-U9.0@80 | SBPD1275 | 0.8 | 0.30 | 崩壊せず |
| C15N27*1 | | 147.0 | | | | | | | 0.27 | 崩壊せず |
| C17N29*2 | | 170.0 | | | | | | | 0.29 | 崩壊せず |
| C17N34*3 | | 165.0 | | | | | | | 0.34 | 309*4 |

*1,*2,*3:ポリプロピレン短繊維をコンクリートに混入

*1:長さ10mm,直径48μm,0.2vol% *2:長さ20mm,直径48μm,0.2vol% *3:長さ20mm,直径48μm,0.3vol%

*4:加熱終了後に崩壊

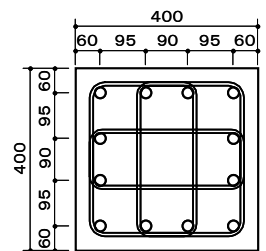


図-1 試験体断面

*1 戸田建設 (株) 技術研究所主管 工修 (正会員)

気中養生した。

2.2 実験方法

実験装置を図-2に示す。実験は、RC柱に中心圧縮力を与える載荷加熱実験であり、加熱区間を2000mm（径長さ比5）とした。加熱は、ISO834の標準加熱温度曲線を用い、原則として4時間加熱し、その後は、自然冷却による温度曲線で実験を継続した。軸力を保持できなくなり崩壊するか、あるいは試験体の中心部の温度が低下するまで軸力を保持し続けた。

2.3 実験結果

各試験体の実験結果を表-1、実験終了時の状況を図-3に示す。C08N30、C15N27 および C17N29 試験体は実験終了時まで崩壊しなかった。C17N34 試験体は加熱開始から309分の冷却過程において、中央高さ位置付近で崩壊した。C15N27 および C17N29 試験体にみられるコンクリートの剥落は冷却過程において表面コンクリートの収縮により生じたものである。

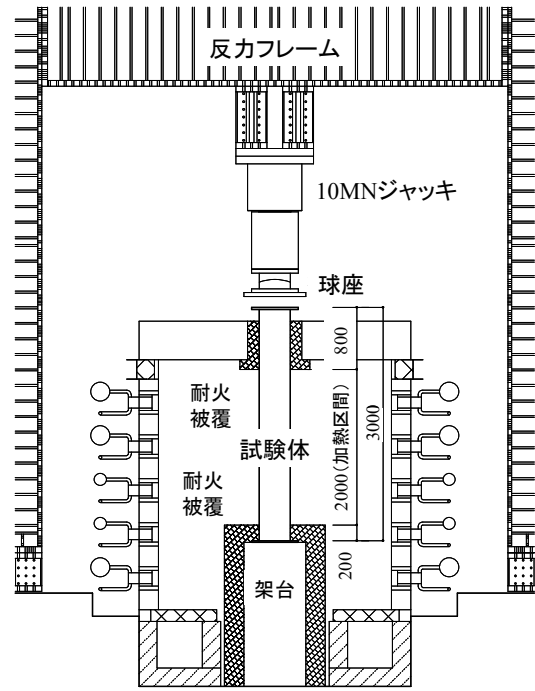


図-2 実験装置

3. 熱伝導解析

3.1 解析方法

熱変形応力解析に用いる断面内の温度分布の時刻歴を得るために、汎用 FEM プログラムを用いて非線形熱伝導解析を行った。

断面を図-4に示すように20×20のメッシュに分割した。解析に用いたコンクリートの熱伝導率および体積比熱については、文献^{4), 5)}を参考に図-5のように設定した。熱伝達率および

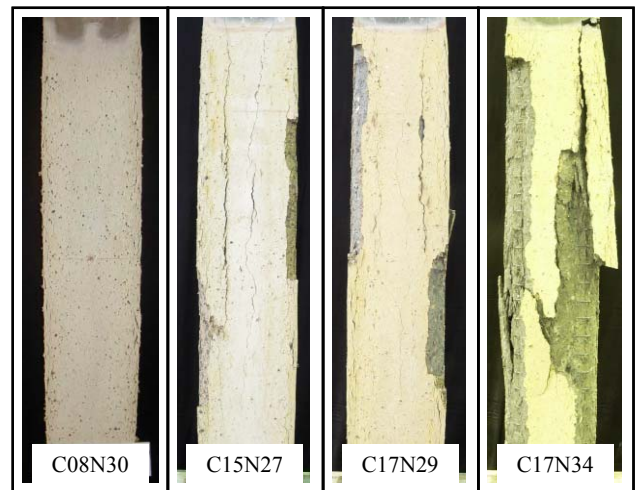


図-3 実験終了時状況

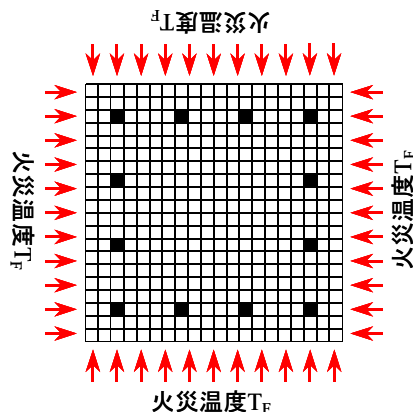


図-4 メッシュ分割

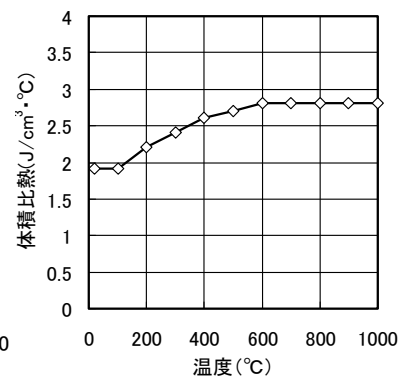
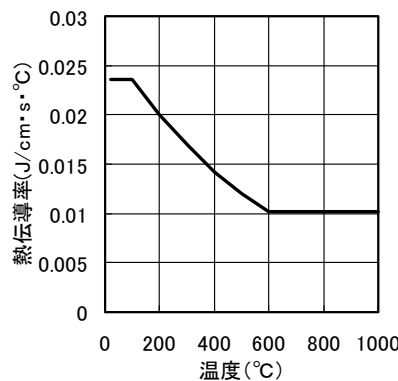


図-5 熱伝導率および体積比熱

蒸発潜熱については表-2のように設定した。

火災温度には実験値を用いた。

3.2 解析結果

崩壊した C17N34 試験体について、中央高さ位置における内部温度分布の実験結果と解析結果の比較を図-6に示す。解析値は中心線方向および対角線方向とも実験値に良く一致した。

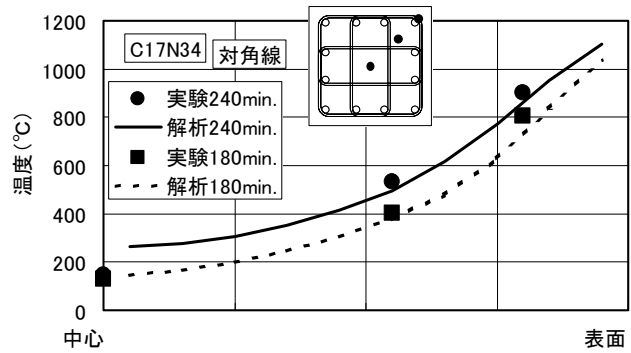
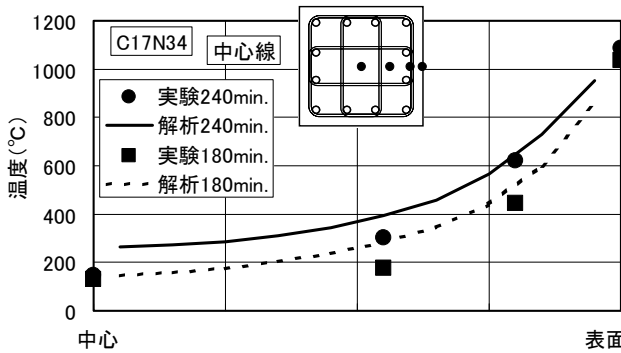


図-6 内部温度分布

4. 熱応力変形解析

4.1 解析方法

解析方法は、図-4に示したように、20×20にメッシュに分割した柱断面について、平面保持の仮定に基づき解析するものである。熱伝導解析により得られた各要素の温度時刻歴を与えた一定圧縮軸力下における1軸圧縮解析である。本解析においては、各要素に熱膨張歪、応力歪およびクリープ歪を考慮し、コンクリート要素には過渡歪も考慮した。即ち、平面保持されるコンクリートと鉄筋の全体歪は式(1)および式(2)で示される全体歪とした。

$$c \varepsilon = c \varepsilon_{th} + c \varepsilon_s + c \varepsilon_{cr} + c \varepsilon_{tr} \quad (1)$$

$$s \varepsilon = s \varepsilon_{th} + s \varepsilon_s + s \varepsilon_{cr} \quad (2)$$

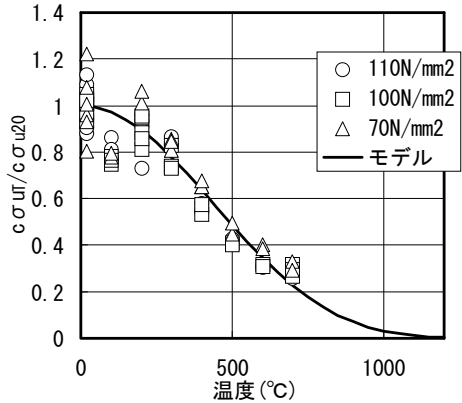
- $c \varepsilon, s \varepsilon$: コンクリートおよび鉄筋の全体歪
- $c \varepsilon_{th}, s \varepsilon_{th}$: コンクリートおよび鉄筋の熱膨張歪
- $c \varepsilon_s, s \varepsilon_s$: コンクリートおよび鉄筋の応力歪
- $c \varepsilon_{cr}, s \varepsilon_{cr}$: コンクリートおよび鉄筋のクリープ歪
- $c \varepsilon_{tr}, s \varepsilon_{tr}$: コンクリートの過渡歪

4.2 応力歪

コンクリートの高温強度、高温強度時歪および応力歪関係について実験値と解析モデルの比較を図-7, 8, 9に示す。コンクリートの応力($c \sigma$)と応力歪($c \varepsilon_s$)の関係については、

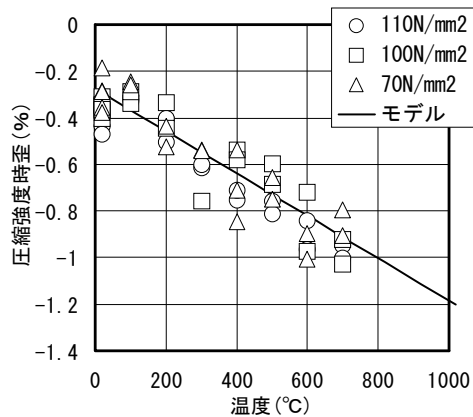
表-2 熱伝達率および蒸発潜熱

| | |
|---|---------------------------|
| 熱伝達率 $h_f [J/(cm^2 \cdot s \cdot ^\circ C)] = h_c + h_R$ | |
| 対流熱伝達率 $h_c = 0.0019$ | |
| 放射熱伝達率 $h_R = \sigma \cdot \varepsilon_w (T_F + T_W)(T_F^2 + T_W^2)$ | |
| 蒸発潜熱の吸収による低下温度 $\Delta t_L (^\circ C) \Delta t_L = 2260 \cdot W / Cp$ | |
| T_F : 火災の絶対温度(K) | 2260: 水の気化熱(J/g) |
| T_W : 部材表面の絶対温度(K) | W : 質量含水率 |
| σ : ステファンボルツマン定数 | Cp : 構成材料の比熱2.5J/(g·°C) |
| ε_w : 合成放射率 ($\varepsilon_w = 0.8$) | |



$$\frac{c \sigma_{uT}}{c \sigma_{u20}} = \left[0.5 \cos \left(\frac{3.14 \times T}{1500} \right) + 0.5 \right]^{2.5}$$

図-7 コンクリートの高温強度



$$c \varepsilon_{uT} = -9.1 \times 10^{-6} \cdot T - 2.74 \times 10^{-3}$$

図-8 コンクリートの高温強度時歪

Popovics の提案モデルを用いた藤田らのモデル⁶⁾とした。70~110N/mm²の強度範囲で実験⁷⁾に良く適合するモデルであるが、150~170 N/mm²の強度に対しても本モデルを適用した。さらに、冷却過程に対応するために、冷却されるコンクリート要素の応力-歪関係を経験最大温度の応力-歪関係から回復しないものとした。

鉄筋の応力($s\sigma$)と応力歪($s\varepsilon_s$)の関係は、図-10に示すように、実験値と良く一致する既報¹⁾と同じとした。

4.3 クリープ歪

クリープ歪の計算式を表-3に示す。コンクリートについては、強度が70~110N/mm²の高温素材試験結果から求められた実験式⁶⁾を用いた。鉄筋のクリープ歪は既報¹⁾と同じとした。

4.4 熱膨張歪および過渡歪

熱膨張歪の計算式を表-4に示す。コンクリートには強度が70~110N/mm²の高温素材試験結果から求められた実験式⁶⁾を用い、鉄筋は既報¹⁾と同じとした。

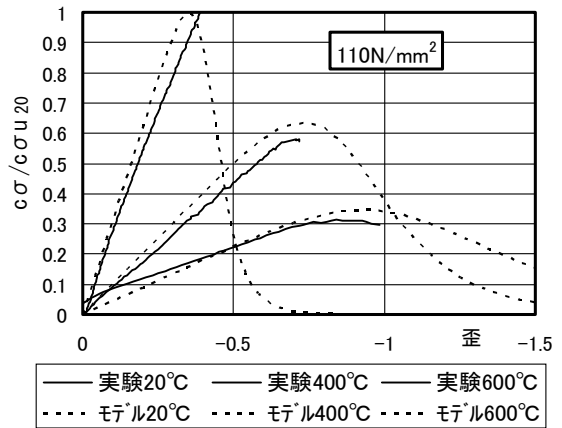
コンクリートの過渡歪の計算式を表-5に示す。強度が70~110N/mm²の高温素材試験結果から得られた係数 $K_2=4.03$ ⁸⁾を用いた。

4.5 解析結果

表-1に示した各試験体の熱応力変形解析結果を温度と軸変形の関係で図-11に示す。全試験体とも実験値と計算値は、加熱から冷却に至るまで良く一致した。冷却過程で崩壊したC17N34試験体については、崩壊時間の実験値が309分であったのに対して解析値が324分とほぼ一致した。本解析法は、超高強度RC柱の加熱から冷却に至るまでの高温性状を適切に評価できるものと考えられる。

5. 累加強度

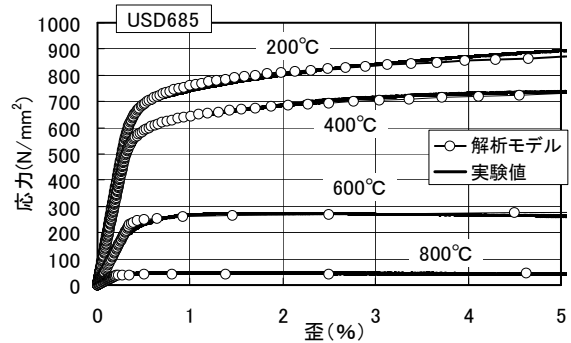
本解析よりも簡便な耐力評価法として累加強度に注目した。累加強度は、コンクリートおよび鉄筋の各要素について、高温強度と面積の積を全要素で累加するものである。崩壊したC17N34試験体について、累加強度、解析値およ



$$c\sigma = c\sigma_{uT} \cdot \frac{c\varepsilon}{c\varepsilon_{uT}} \cdot \frac{n_T}{n_T - 1 + (c\varepsilon/c\varepsilon_{uT})^{n_T}}$$

$$n_T = 7.5 - 6.0 \times 10^{-3} \cdot T \geq 2.0$$

図-9 コンクリートの応力-歪関係



$$s\varepsilon_s = \frac{s\sigma}{E} + \left(\frac{s\sigma}{\sigma_k} \right)^k$$

図-10 鉄筋の応力-歪関係

表-3 クリープ歪

| コンクリート | 鉄筋 |
|--|---|
| $c\varepsilon_{cr} = \beta_0 \left(\frac{t}{t_r} \right)^p \cdot \frac{c\sigma}{c\sigma_{u20}} \cdot e^{k_1(T-20)}$ | $s\varepsilon_{cr} = 10^A s\sigma^B t^n$ |
| $\beta_0 = -0.00088 \quad k_1 = 0.0026$ $t_r = 300 \text{分} \quad p = 0.46$ | $s\sigma$: 応力(kgf/mm ²) t: 時間(分) $A = -7450/(T+273)+3.71$ $B = 1780/(T+273)+1.82$ $n = 6.47 \times 10^{-4} T - 0.151$ |

表-4 熱膨張歪

| |
|--|
| コンクリート $(20^\circ\text{C} \leq T \leq 700^\circ\text{C})$ $\Delta_c \varepsilon_{th} = 5.0 \times 10^{-6} + 6.9 \times 10^{-11} \cdot T^2$ $(T \geq 700^\circ\text{C})$ $\Delta_c \varepsilon_{th} = 0$ |
| 鉄筋 $\Delta_s \varepsilon_{th} = \Delta T (1.08 \times 10^{-5} + 6.75 \times 10^{-9} T)$ |

表-5 コンクリートの過渡歪

$$c\varepsilon_{tr} = -K_2 \cdot \frac{c\sigma}{c\sigma_{u20}} \cdot c\varepsilon_{th} \quad K_2 = 4.03$$

び実験値の比較を図-12 に示す。累加強度は実験値および解析値に一致していることから、耐火性能評価への適用性が伺える。

耐火性能評価への累加強度の適用性について検討するためにパラメトリック解析を行った。断面は 40cm×40cm, 主筋は USD685 ($P_g=2.15\%$) で共通とした。パラメーターはコンクリート強度 (80N/mm^2 と 150N/mm^2), 軸力比 (0.2~0.8) およびコンクリートに特有の過渡歪の有無である。加熱は ISO834 の標準加熱温度曲線による

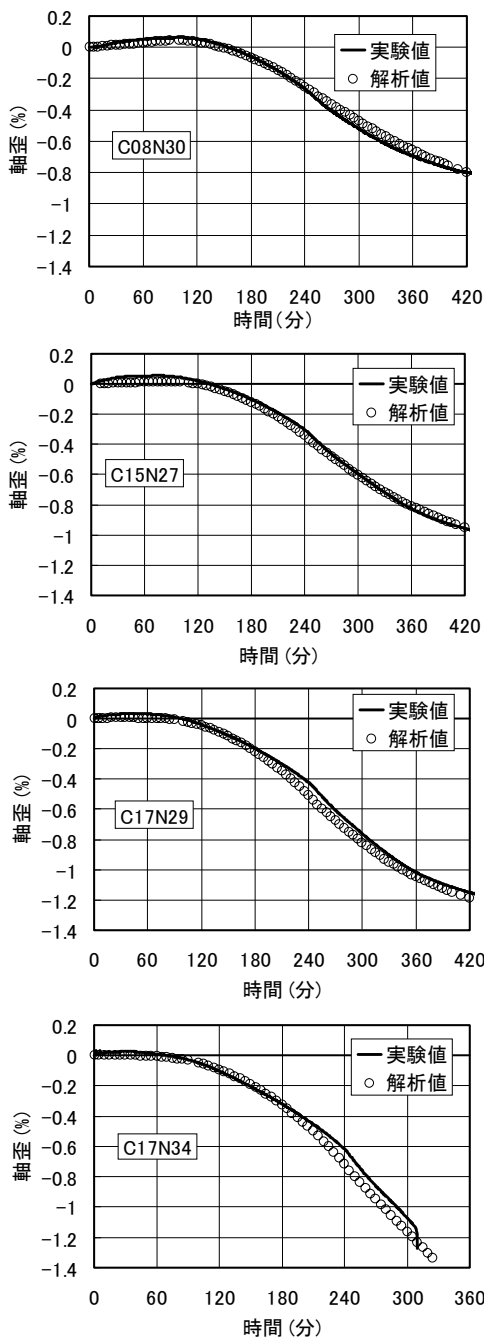


図-11 実験値と解析値の比較

420 分間とした。

累加強度と解析結果の比較を崩壊時間と軸力比の関係で図-13 に示す。過渡歪なしの解析結果は累加強度を若干下回るものの、両者は良く一致した。過渡歪ありの解析結果は 0.5 以上の高軸力比において、崩壊時間が他に比べて短くなった。即ち、過渡歪は耐火性能評価法への累加強度の適用性を低下させる要因である。

コンクリート強度が 150N/mm^2 について崩壊直前における断面内全要素の諸歪と温度の関係を図-14 に示す。上図は軸力比が 0.6 で過渡歪あり, 中図は軸力比が 0.6 で過渡歪なし, 下図は軸力比が 0.3 で過渡歪ありの場合である。軸力比 0.6 について過渡歪の有無を比べると、過渡歪な

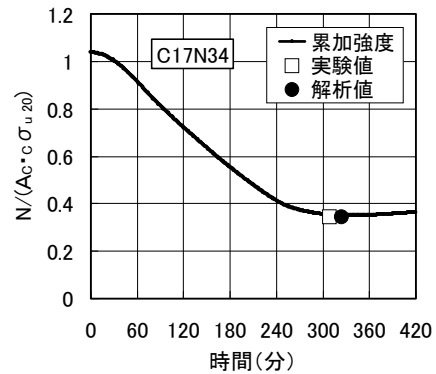


図-12 累加強度計算値と実験値の比較

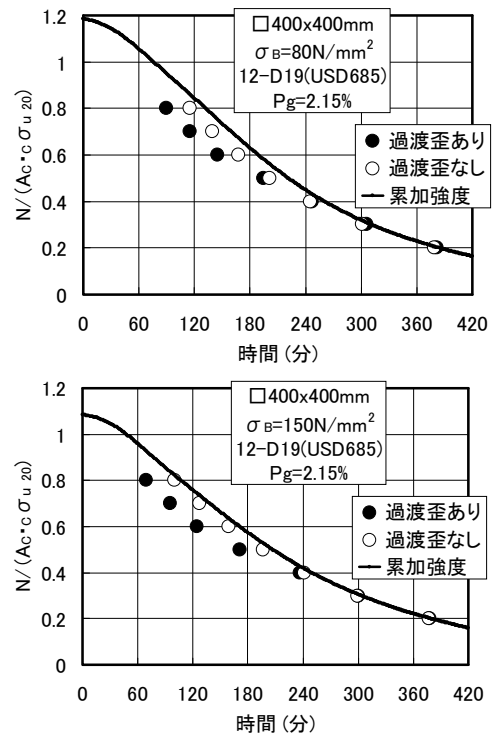


図-13 累加強度計算値と解析値の比較

しの場合、クリープ歪が相対的に小さいため熱膨張歪と応力歪がほぼ正負対称となり応力歪と最大強度歪が近接していたが、過渡歪ありの場合は、過渡歪が相対的に大きいため 200°C 以上では応力歪が最大強度歪よりも小さくなった。軸力比 0.3 については、過渡歪が大きいが全体歪も大きいため応力歪と最大強度歪が比較的近接した。累加強度は応力歪が最大強度歪に一致した強度であることから、過渡歪が累加強度の適用性を低下させることが判った。以上から、長期許容応力度以下では耐火性能評価として累加強度が適用できるものと考えられる。

6. まとめ

超高強度 RC 柱の耐火性能評価について実験および解析的に検討し、以下の知見を得た。

- (1) 冷却されるコンクリート要素の応力-歪関係を経験最大温度の応力-歪関係から回復しないものとするにより、冷却過程で崩壊した実験値と解析値は良く一致した。
- (2) 長期許容応力度設計された柱部材の耐火性能は、累加強度を用いて評価できたが、軸力比 0.5 以上の高軸力においては、過渡歪の影響で累加強度の適用性が低下した。

参考文献

- 1) 菊田繁美ほか：超高強度コンクリート柱の耐火性に関する解析的研究, コンクリート工学, Vol.25, No.2, pp.187-192, 2003.7
- 2) 松戸正士ほか：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)(その2), 日本建築学会大会, 防火, pp.21-24, 2002.8
- 3) 松戸正士ほか：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)~(その11), 日本建築学会大会, 防火, pp.75-80, 2005.9
- 4) 土井文好ほか：超高強度コンクリートの熱的性質に関する実験的研究, コンクリート工学, Vol.15, No.1, pp.109-114, 1993.7

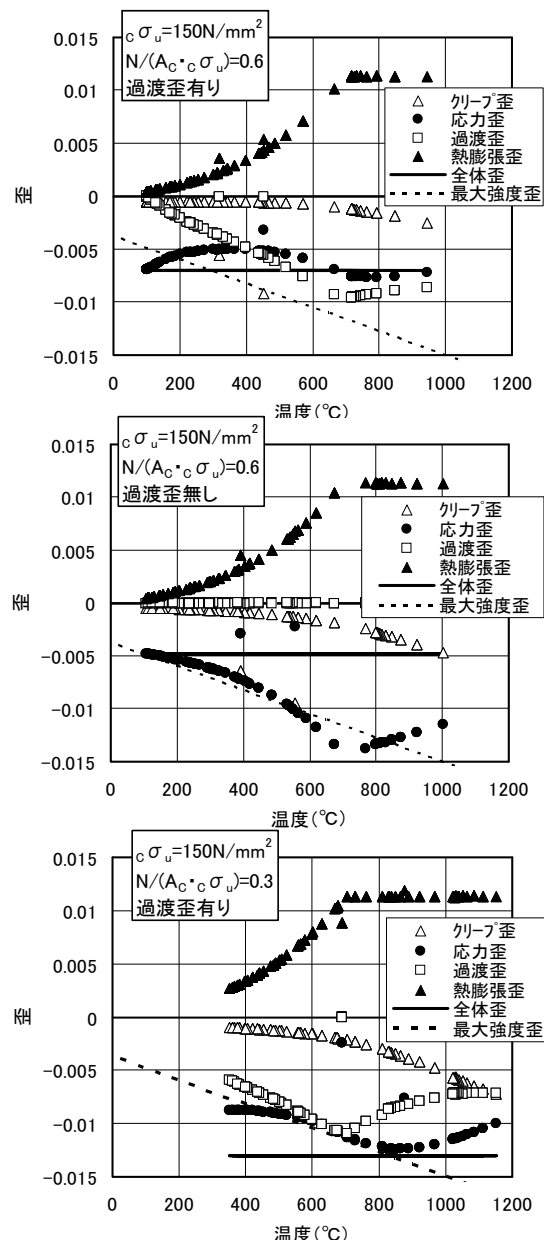


図-14 各要素の諸歪

- 5) 日本建築センター：建築物の総合防火設計法 (第4巻 耐火設計法), 1989.4
- 6) 藤田大ほか：標準加熱を受ける高強度 RC 柱の熱変形解析, 日本建築学会大会, 防火, pp.89-90, 2004.8
- 7) 豊田康二ほか：火災加熱を受ける超高強度コンクリートの力学的特性に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.49B, pp.367-374, 2003.3
- 8) 山下平祐ほか：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, 防火, pp.75-76, 2004.8