

論文 超高強度鉄筋コンクリート柱の耐火性に関する解析的研究

菊田 繁美*1 ・ 平島 岳夫*2 ・ 吉田 正友*3 ・ 上杉 英樹*4

要旨：本研究は、Fc80～Fc100の超高強度コンクリートを用いた鉄筋コンクリート柱の耐火性について解析的に検討したものである。解析は、コンクリートの爆裂を考慮した熱伝導解析により得られる断面内の温度時刻歴を用いて、コンクリートと鉄筋の応力歪，熱膨張歪，クリープ歪およびコンクリートの過渡歪を考慮した熱応力変形解析である。縮小模型柱の荷重加熱実験結果から本解析手法の妥当性を検証し、実大断面柱の長期荷重下における高温軸圧縮性状について解析的に検討した。その結果、超高強度コンクリートを用いた実大断面柱は3時間をはるかに上回る耐火性能を有するものと考えられる。

キーワード：超高強度，耐火性，爆裂，熱膨張歪，過渡歪，クリープ歪

1. はじめに

超高強度コンクリートを用いた鉄筋コンクリート柱は火災時に爆裂の発生する可能性が高いため、長期荷重下における耐火性能を適切に評価できないのが現状である。また、超高強度コンクリート柱の実大断面の実験には大きな荷重能力を有する耐火試験装置が必要となるために実験結果が存在せず、大きな熱容量を有する実大鉄筋コンクリート柱の耐火性能を縮小模型による実験結果から適切に評価する方法も確立されていない。本研究は、超高強度コンクリートを対象に実大断面柱の耐火性能を解析的に評価したものである。本解析は、コンクリートの爆裂を考慮した熱伝導解析により得られる断面内の温度時刻歴を用いて、コンクリートと鉄筋の応力歪，熱膨張歪，クリープ歪およびコンクリートの過渡歪を考慮した熱応力変形解析を行うものである。縮小模型柱の荷重加熱実験結果から本解析手法の妥当性を検証し、実大断面柱の長期荷重下における高温軸圧縮性状について解析的に検討した結果を報告する。

2. 熱伝導解析

本解析は、差分法2次元熱伝導計算によるものである。解析モデルを図-1に示す。火災に

よる部材表面への熱伝達は、火炎、火災区画壁、燃焼物表面等からの放射熱伝達と火災気流からの対流熱伝達によるものとし、熱伝達率 h_f は放射熱伝達率 h_R と対流熱伝達率 h_C の和($h_f = h_R + h_C$)として与えた。

放射熱伝達率 h_R [W/(cm²・°C)]には、式(1)を用い、対流熱伝達率 h_C には、0.001W/(cm²・°C)の一定値を用いた。

$$h_R = 5.67 \times 10^{-12} \varepsilon_w (T_F + T_W)(T_F^2 + T_W^2) \quad (1)$$

T_F ：火災の絶対温度 (K)

T_W ：部材表面の絶対温度 (K)

ε_w ：合成輻射率 ($\varepsilon_w = 0.9$)

含有水分は、100°Cにおいて蒸発潜熱を吸収し、水蒸気となって存在位置から外部へ放散される

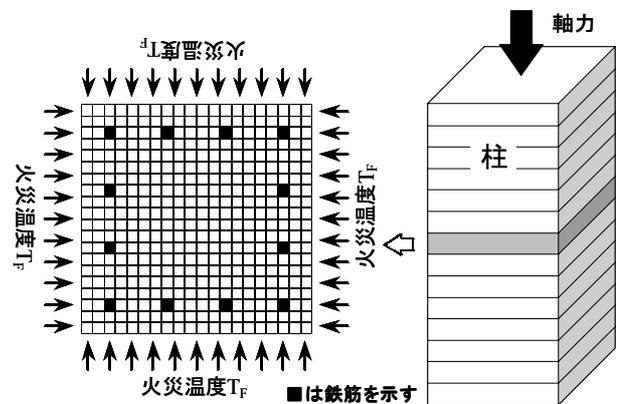


図-1 解析モデル

*1 戸田建設株式会社技術研究所複合構造プロジェクトチーム 工修 (正会員)

*2 千葉大学 工学部 デザイン工学科 建築系助手 工修

*3 (財)日本建築総合試験所 建築物理部部长 工博

*4 千葉大学 大学院自然科学研究科 人間・地球環境科学専攻 環境建築学教授 工博

ものと仮定した。単位体積当たりの蒸発潜熱の吸収による低下温度 Δt_L は式(2)で表されるものとした。

$$\Delta t_L = 2260 \cdot W/C_p \quad (^\circ\text{C}) \quad (2)$$

2260 : 水の気化熱 (J/g)
W : 質量含水率
C_p : 構成材料の比熱 2.5J/(g · °C)

コンクリートの熱伝導率 λ [W/(cm · °C)] および比熱 C_p [J/(g · °C)] は、文献1)を参考に式(3)に示す温度 T(°C) の関数とした。

$$\begin{aligned} (T \leq 100^\circ\text{C}) \quad \lambda &= 0.0151 \\ C_p &= 2.5 \\ (T > 100^\circ\text{C}) \quad \lambda &= 0.0197 - 0.0000126T \\ C_p &= \lambda (99 + 0.3T) \end{aligned} \quad (3)$$

3. 熱応力変形解析

3.1 解析方法

解析方法は、図-1に示したように、20x20に分割した柱の断面について、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て、一定圧縮軸力下における軸変形量を解析した。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た。また、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歪は式(4)および式(5)で示される全歪とした。

$${}^c \varepsilon = {}^c \varepsilon_{th} + {}^c \varepsilon_s + {}^c \varepsilon_{cr} + {}^c \varepsilon_{tr} \quad (4)$$

$${}^s \varepsilon = {}^s \varepsilon_{th} + {}^s \varepsilon_s + {}^s \varepsilon_{cr} \quad (5)$$

- ${}^c \varepsilon, {}^s \varepsilon$: コンクリートおよび鉄筋の全歪
- ${}^c \varepsilon_{th}, {}^s \varepsilon_{th}$: 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

3.2 熱膨張歪

コンクリートの熱膨張歪に EuroCode 式²⁾を適用すると、線膨張係数 ($\Delta_c \varepsilon_{th}$) は式(6)のように示される。式(6)については、日本のコンクリートにも適合することが示されている³⁾⁴⁾。

$$(20^\circ\text{C} \leq T < 700^\circ\text{C})$$

$$\Delta_c \varepsilon_{th} = 9.0 \times 10^{-6} + 6.9 \times 10^{-11} T^2 \quad (6)$$

$$(700^\circ\text{C} \leq T)$$

$$\Delta_c \varepsilon_{th} = 0$$

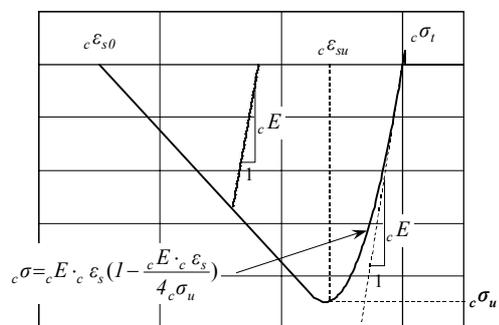
鉄筋の線膨張係数 ($\Delta_s \varepsilon_{th}$) は温度 T(°C) の関数である式(7)に従うものとした⁵⁾。式(7)は EuroCode 式²⁾にほぼ一致するものである。

$$\Delta_s \varepsilon_{th} = \Delta T (1.08 \times 10^{-5} + 6.75 \times 10^{-9} T) \quad (7)$$

3.3 応力歪

コンクリートの応力 (${}^c \sigma$) と応力歪 (${}^c \varepsilon_s$) の関係は図-2に示すものとした。EuroCode 式²⁾は高強度コンクリートの最大強度までの剛性を過大評価するために採用しなかった。高温時の圧縮強度 (${}^c \sigma_u$) および最大強度時の歪 (${}^c \varepsilon_{su}$) は、直径 75mm で高さ 150mm のテストピースを用いて行った高温素材試験結果の近似式を採用した。常温圧縮強度が 94N/mm² と 119N/mm² の高温素材試験結果と本解析モデルの比較を図-3に示す。EuroCode 式ほどではないものの、本解析モデルにおいても素材試験に比べて最大強度までの剛性を若干大きめに評価する傾向にある。

鉄筋の応力 (${}^s \sigma$) と応力歪 (${}^s \varepsilon_s$) の関係は高温素材試験結果を用いて文献1)に示される式(8)に従うものとした。高温素材試験結果から得られた高温時の特性値を表-1に示す。応力と応力歪の関係は図-4に示すように、解析モデルと実験値が良く一致した。



$$\frac{{}^c \sigma_u}{{}^c \sigma_{u,RT}} = 0.5 \cos \left\{ \pi \sin \left(\frac{\pi T}{3000} \right) \right\} + 0.5 \quad cE = 2 \frac{{}^c \sigma_u}{{}^c \varepsilon_{su}}$$

$${}^c \varepsilon_{su} = -0.000013T - 0.0037 \quad {}^c \varepsilon_{s0} = -0.02 - \frac{3T}{120000}$$

図-2 コンクリートの応力と応力歪の関係

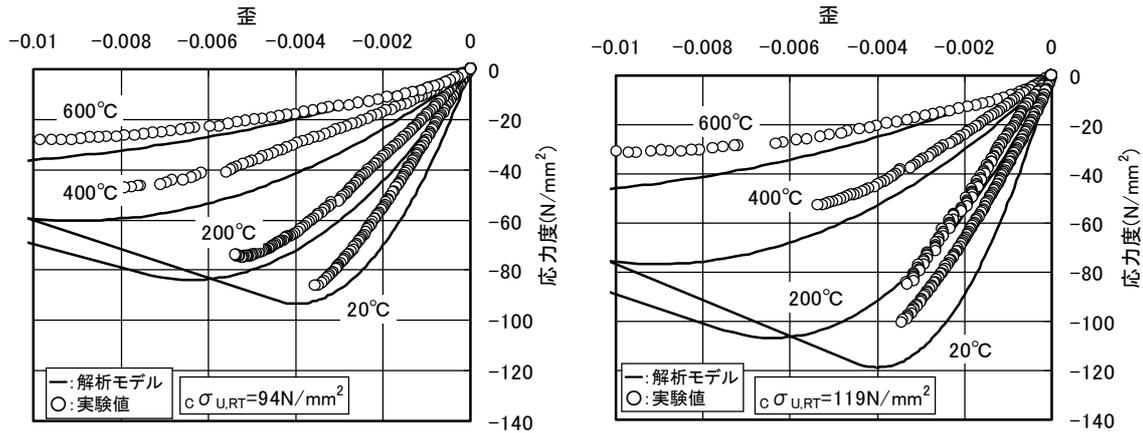


図-3 コンクリートの実験値と解析モデルの比較

$${}_s \varepsilon_s = \frac{{}_s \sigma}{{}_s E} + \left(\frac{{}_s \sigma}{\sigma_k} \right)^k \quad (8)$$

3.4 クリープ歪

コンクリートのクリープ歪はコンクリート強度が37N/mm²の高温素材試験結果³⁾⁴⁾を参考に式(9)に従うものとした。

$${}_c \varepsilon_{cr} = \beta_0 \left(\frac{t}{t_r} \right)^p \cdot \frac{{}_c \sigma}{{}_c \sigma_u} \cdot e^{k_1(T-20)} \quad (9)$$

$$\beta_0 = 0.0002 \quad k_1 = 0.0056$$

$$t_r = 300 \text{分} \quad p = 0.3$$

鉄筋のクリープ歪は文献1)に示される式(10)に従うものとした。

$${}_s \varepsilon_{cr} = 10^A {}_s \sigma^B t^n \quad (10)$$

${}_s \sigma$: 応力 (kgf/mm²) t : 時間 (分)

$$A = -7450/T + 3.71 \quad T: \text{絶対温度 (K)}$$

$$B = 1780/T + 1.82 \quad n = 6.47 \times 10^{-4} T - 0.151$$

3.5 過渡歪

コンクリートの過渡歪は式(11)に従うものとした⁶⁾。K₂の値としては、1.75, 1.8, 2.0, 2.35とする報告例³⁾⁴⁾⁶⁾があり、この中で比較的高強度のコンクリートを用いた文献に示されるK₂=2.35とした⁶⁾。

$${}_c \varepsilon_{tr} = -K_2 \cdot \frac{{}_c \sigma}{{}_c \sigma_u} \cdot {}_c \varepsilon_{th} \quad (11)$$

4. 载荷加熱実験⁷⁾

試験体形状および試験条件一覧を図-5および

表-1 鉄筋の高温時の特性値

| °C | 20 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 800 | 1000 |
|-------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|
| E _r (N/mm ²) | 220550 | 190100 | 180300 | 168600 | 127250 | 67350 | 18700 | 13450 |
| σ _y (N/mm ²) | 798.5 | 749 | 752 | 640 | 458 | 275 | 44 | 19 |
| k | 33.7 | 15.1 | 13.7 | 16.1 | 15.7 | 36.3 | 28.6 | 11.3 |
| σ _k (N/mm ²) | 972.7 | 1066.8 | 1089.2 | 884.1 | 613.2 | 300.4 | 49.1 | 27.9 |

σ_y: 1%歪時強度

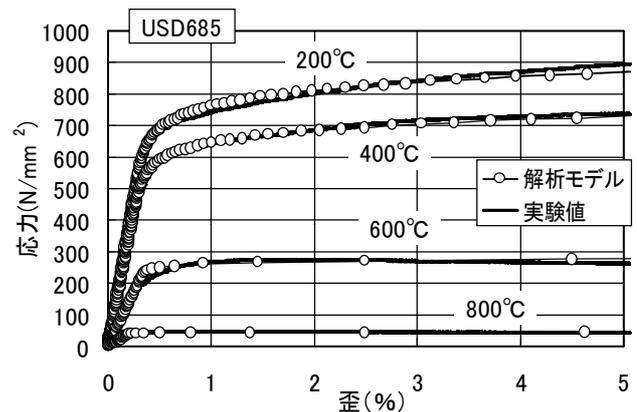


図-4 鉄筋の高温素材試験結果と解析モデルの比較

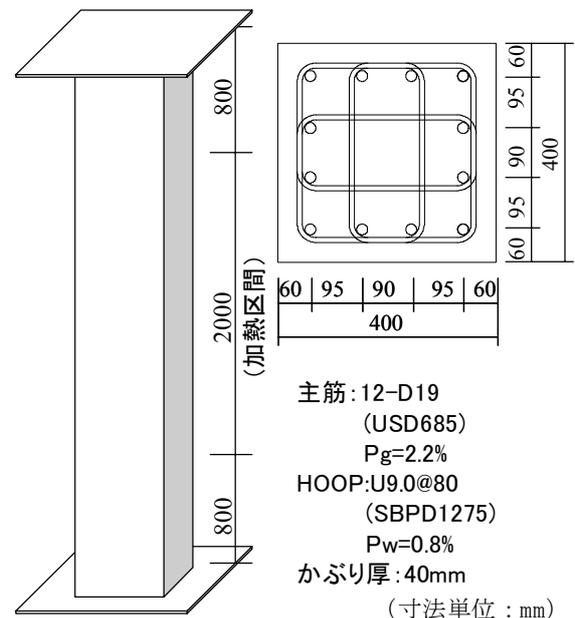


図-5 载荷加熱実験の試験体形状

び表-2に示す。試験体はコンクリート強度が約130,110,80N/mm²の3水準、軸力比が0.27～0.44とした5体である。試験体断面は40cm×40cm、鉄筋の最小かぶり厚さは4cmである。主筋にはUSD685、せん断補強筋にはSBPD1275を用いた。コンクリートの調合を表-3に示す。試験体は室内で気中養生し、実験時の材齢を約8ヶ月とした。含水率は、文献8)の手法によると表面で約5%、中心部で6～8%であった。

載荷加熱実験は、柱に一定の圧縮軸力を作用させた状態で、ISO834の標準加熱温度曲線による4時間の加熱を行った後に自然冷却させたものである。

コンクリート強度の異なるC13N27,C11N30およびC08N30試験体の実験終了後の状況を写真-1に示す。爆裂状況はC13N27は加熱後9分頃から36分頃まで全体に爆裂が発生した。C11N30は、14分頃から25分頃まで柱脚部付近を中心とした爆裂が発生した。C08N30では、35分頃に縦方向に亀裂が入り徐々に拡大し、195分頃にコンクリートが剥落した。

試験体全長における軸変形の時刻歴を図-6に示す。C13N27試験体のみが206分後の加熱中に軸力を保持できなくなった。C11N35とC08N44試験体は加熱終了後の冷却中に軸力を保持できなくなった。C11N30とC08N30試験体は実験終了時まで軸力を保持していた。

5. 解析手法の検証

5.1 熱伝導解析

爆裂による表面コンクリートの消失が断面内温度分布に影響を及ぼすため爆裂性状を適切に評価する必要がある。側面中央部付近のコンクリートが爆裂する傾向にあるが、材軸方向に異なる爆裂性状を示すため詳細にモデル化するのは困難である。本解析では図-7に示すように爆裂した断面積を平均爆裂深さでモデル化した。爆裂は加熱初期15～20分が最も激しく、40分以降ほとんど進展しなかったことから、平均爆裂深さのかぶりコンクリートは当初から存在しなかったものとした。平均爆裂深さを

表-2 試験条件一覧

| 試験体名 | 調合番号 | 設計基準強度 F _c (N/mm ²) | 実強度 cσ _U (N/mm ²) | 軸力 σ _N ・A _c (kN) | 軸力比 σ _N /cσ _U | 実験時 材齢 (日) |
|--------|------|--|--|--|--|------------------|
| C13N27 | S18 | 100 | 126.5 | 5443 | 0.27 | 258 |
| C11N30 | S24 | 80,100 | 113.4 | 5443 | 0.30 | 251 |
| C11N35 | S24 | 80,100 | 113.4 | 6104 | 0.35 | 272 |
| C08N30 | S35 | 80 | 77.3 | 3710 | 0.30 | 239 |
| C08N44 | S35 | 80 | 77.3 | 5443 | 0.44 | 266 |

表-3 コンクリートの調合

| 調合番号 | W/B (%) | 単位量(kg/m ³) | | | | | | 混和剤 使用量 (B×%) |
|------|---------|-------------------------|-----|-----|-----|-----|----|---------------------|
| | | W | C | S1 | S2 | G | SF | |
| S18 | 18 | 160 | 800 | 164 | 385 | 848 | 89 | 1.5 |
| S24 | 24 | 160 | 600 | 218 | 517 | 848 | 67 | 1.8 |
| S35 | 35 | 165 | 424 | 265 | 621 | 848 | 47 | 1.4 |

[使用材料]
 水(W): 上水道水
 セメント(C): 低熱ポルトランドセメント 密度 3.22g/cm³
 細骨材: 市原産山砂(S1) 表乾密度 2.57g/cm³、
 相模川水系陸砂(S2) 表乾密度 2.60g/cm³
 粗骨材(G): 青梅産砕石(硬質砂岩) 表乾密度 2.65g/cm³
 混和材(SF): 粉体シリカフューム 密度 2.20g/cm³
 混和剤: 高性能AE減水剤(ポリカルボン酸系)
 結合材(B): セメント(C)+混和材(SF)

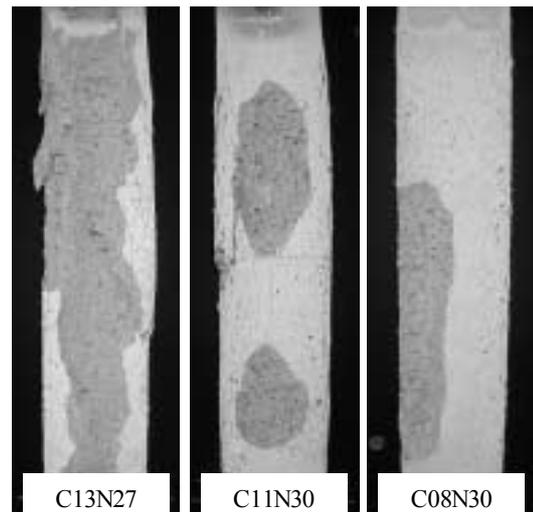


写真-1 実験終了後の状況

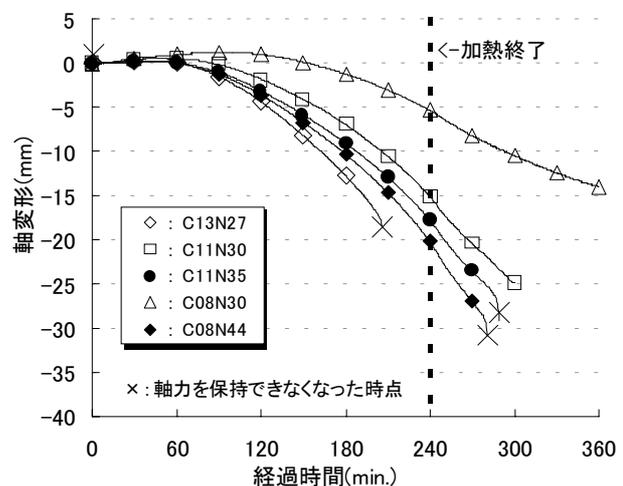


図-6 軸変形の時刻歴

C13N27試験体では20mm, C11N30とC11N35試験体では10mmとし, C08N30とC08N44試験体では爆裂なしとした。

爆裂しなかったC08N30試験体と比較的爆裂の激しかったC13N27試験体の断面内温度分布について実験値と解析値の比較を図-8に示す。両試験体とも, 解析値は実験値に比べて若干高めの温度分布となっているものの適切な評価できると考えられる。

5.2 熱応力変形解析

熱伝導解析の温度分布時刻歴を用いた熱変形応力解析により得られた軸変形の時刻歴と実験値の比較を図-9に示す。C08N44, C11N30および

C11N35に示すように, 180分までは解析値と実験値はほぼ一致した軸変形であったが, その後の解析値は, 軸変形が大きくなり実験値に比べて短い耐火時間となった。C13N27は180分までの軸変形が一致しないものの耐火時間がほぼ一致した。従って, 本解析により超高強度鉄筋コンクリート柱の耐火性能を適切に評価できるものと考えられる。

6. 実大柱の耐火性能

前記した解析手法を用いて実大柱の耐火性能について検討した。実大断面柱の爆裂性状を把握する目的で行った柱試験体の断面を図-10に示す。実験装置の载荷能力の制限のために軸力比を0.1とした。実験終了後における平均爆裂深さは約3cmであった。軸変形に関して, 解析結果と実験結果の比較を図-11に示す。実験から加熱後約2時間で熱膨張による最大伸び変形

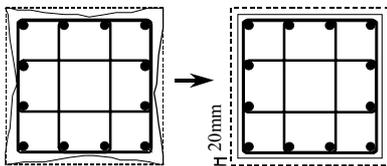


図-7 モデル化による平均爆裂深さ

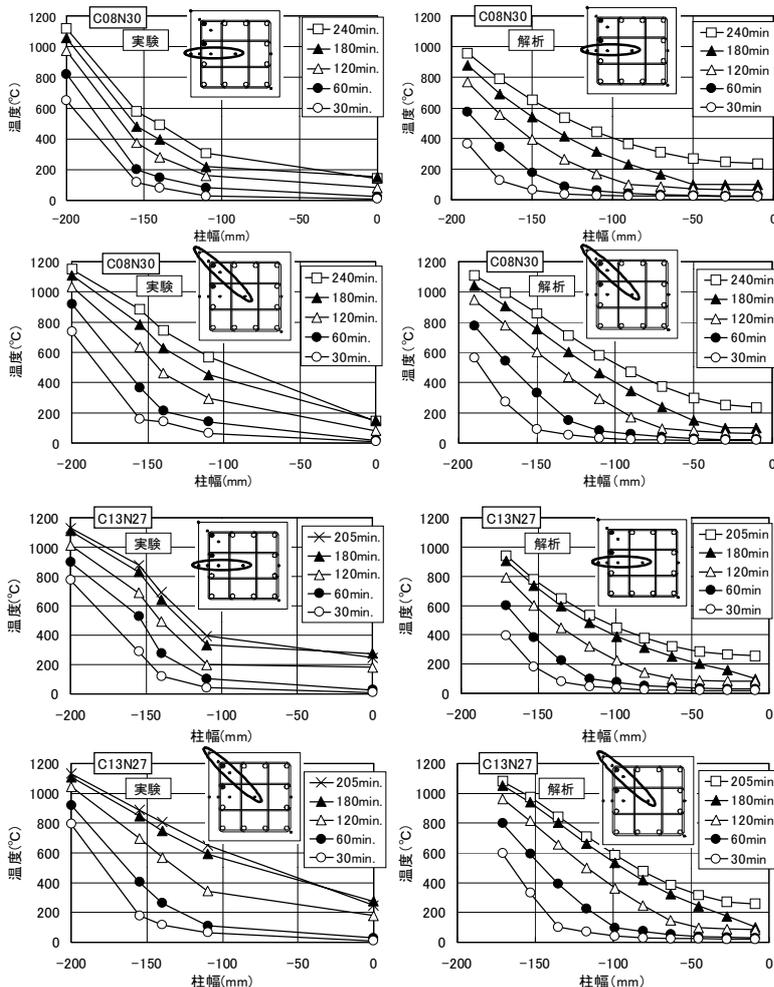


図-8 断面内温度分布の実験値と解析値の比較

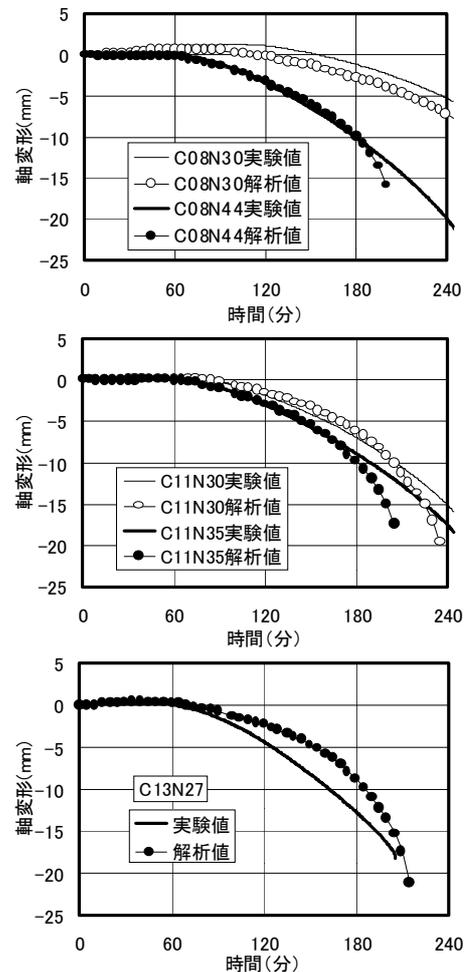


図-9 軸変形の実験値と解析値の比較

を示し、3時間経過しても約2mmの伸び変形を示した。解析値は実験値にほぼ一致しており、本解析法は実大柱の高温軸圧縮性状を推定できるものと考えられる。

軸力比を0.3とした場合について、軸歪の時刻歴を図-12に示す。ISO834の標準加熱温度曲線の3時間加熱時における軸歪は0.00073と僅かであった。7時間(420分)加熱時においてもISO834に示される許容軸歪(0.01)の半分程度であった。

以上より、コンクリート強度が115N/mm²で70cm×70cm断面の柱は、爆裂により平均厚さ3cmのかぶりコンクリートが剥落しても7時間以上の十分な耐火性能を有するものと考えられる。

7. まとめ

超高強度コンクリートを用いた鉄筋コンクリート柱の耐火性について解析的に検討した結果、以下の結論を得た。

- ①コンクリートの爆裂を考慮した熱伝導解析と、コンクリートと鉄筋の応力歪、熱膨張歪、クリープ歪およびコンクリートの過渡歪を考慮した熱応力変形解析を用いて、超高強度鉄筋コンクリート柱の高温軸圧縮性状を概ね評価できた。
- ②実大断面柱は、爆裂によりかぶりコンクリートが剥落しても十分な耐火性能を有するものと考えられる。

8. あとがき

筆者らは、超高強度コンクリートの高温時性能を把握すべく実験研究を行っているところであり、今後さらに精度の高い解析とする予定である。なお、本研究は、熊谷組、佐藤工業、戸田建設、西松建設、ハザマ、フジタ、前田建設工業の7社が(財)日本建築総合試験所に齋藤光博士(千葉大学名誉教授)を委員長とする委員会を設置して実施したものであり、全委員の協力によって行われたものである。

参考文献

- 1) 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

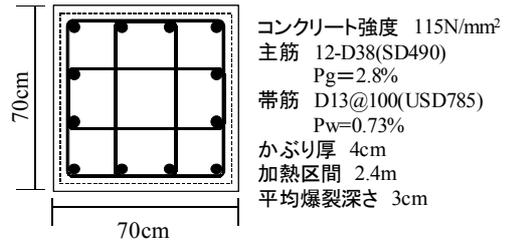


図-10 実大スケール試験体

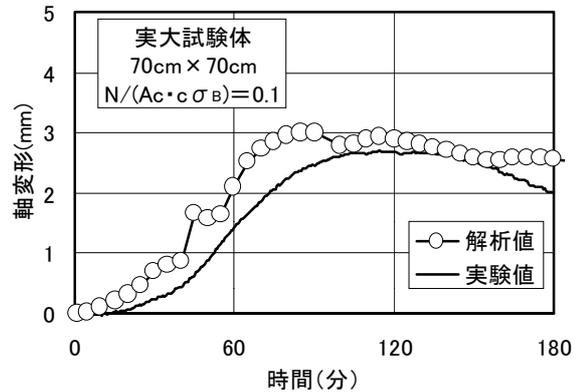


図-11 軸変形の実験値と解析値の比較

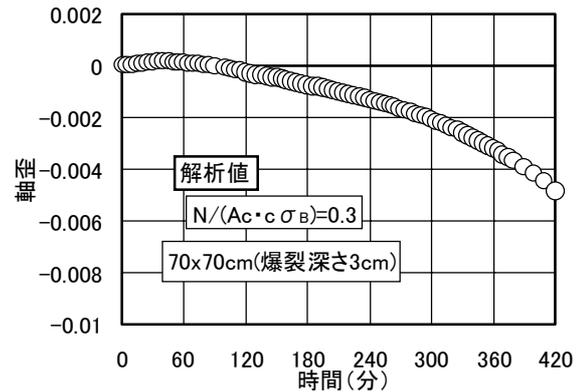


図-12 軸歪みの時刻歴

- 2) Eurocode 4 : Design of Composite Steel and Concrete structures, 1994
- 3) 常世田昌寿ほか: 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1)(その2), 日本建築学会大会, 防火, pp. 23-26, 2001. 9
- 4) 常世田昌寿ほか: 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3)(その4)(その5), 日本建築学会大会, 防火, pp. 31-36, 2002. 8
- 5) Tasnim Uddin, Charles G. Culver, Effects of Elevated Temperature on Structural Members, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol.101, No.ST7, 1975.7
- 6) Y.Anderberg, S.Thelandersson, Stress and Deformation Characteristics of Concrete at High Temperature, Lund Institute of Technology, Bulletin No.54, Lund, Sweden 1976
- 7) 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
- 8) 西田 他: 高強度コンクリートの含水率測定方法の提案, 日本建築学会大会, 材料施工, pp. 359-360, 2001. 9