

超高強度コンクリートを用いた RC 柱の耐火性に関する解析的検討

ANALYTICAL STUDY ON FIRE RESISTANCE OF REINFORCED CONCRETE COLUMNS USING HIGH-STRENGTH CONCRETE

右田 周平*¹, 梅本 宗宏*²
Shuhei MIGITA and Munehiro UMEMOTO

Reinforced concrete columns using high-strength concrete, which are at risk of spalling in fire, it is known that spalling can be suppressed by mixing polypropylene fibers in concrete. In addition, from the request of the low shrinkage of the concrete, use of limestone coarse aggregate in the field of high-strength concrete is increasing. However, the influence of the effect of coarse aggregate gives to spalling is not clear. In this study, we carried out the heating experiment and confirmed of fire resistance to target the 80~100N/mm² class high-strength concrete that was using a variety of bone material, confirmed the fire resistance of reinforced concrete columns. And It was confirmed that thermal stress analysis on loading test of reinforced concrete columns was carried out and tried to estimate fire performance analytically by using past experimental results.

Keywords : High-Strength Concrete, Limestone Coarse Aggregate, Fire Resistance, Fire Resistance Test Under Load, Spalling, Thermal Conduction Analysis, Thermal Stress Analysis

高強度コンクリート, 石灰石粗骨材, 耐火性能, 載荷加熱実験, 爆裂, 熱伝導解析, 熱応力解析

1. はじめに

筆者らは、前報¹⁾において、石灰石粗骨材および硬質砂岩砕石を用いた、設計基準強度（以下、 F_c と略記）80~100N/mm²級高強度コンクリートを使用した鉄筋コンクリート柱（以下、RC 柱と略記）について、載荷加熱実験や実大加熱実験の結果を報告した。本報では、引き続き、既往の研究結果を参考に載荷加熱実験の解析を行い、熱応力解析による RC 柱の耐火性能の推定を試みた。その結果について報告する。

2. 解析概要

表-1 に解析の対象とした RC 柱の概要を示す。対象の RC 柱は、いずれも断面は 400mm×400mm で高さは 2000mm である。解析では、始めに熱伝導解析により柱内部の温度を推定し、その結果を用いて熱揚力解析を行い、RC 柱の耐火性能を推定した。熱伝導解析、熱応力解析共に断面は 20mm×20mm のメッシュ割りとした。また、爆裂のモデル化は、表層部にあるメッシュの幅を調整し、解析開始時点から断面全体が表-1 に示す平均爆裂深さ分だけ減少しているものとした。

なお、熱伝導解析では市販のマスコンクリート用温度応力解析を、熱応力解析では千葉大学で開発された熱応力解析プログラム¹⁾を使用した。

3. 熱伝導解析

RC 柱内部温度の推定のため、熱伝導解析を実施した。加熱は図-1 に示す ISO834 標準加熱時間温度曲線による 4 時間加熱とし、RC 柱断面はコンクリートのみと仮定した。また、加熱面の熱伝達率、コンクリートの熱伝導率、比熱は鎌田らの研究²⁾を参考に、実験結果と整合性を踏まえ、それぞれ 150W/m²·K, 0.9W/m·K, 0.9kJ/kg·K とした。解析結果と実験結果の一例を図-2 に示す。これよりコンクリート表層

表-1 解析対象

試験体	繊維混入率 (vol%)	平均爆裂深さ (mm)	軸変位 (mm)		崩壊時間 (分)
			加熱終了時	載荷終了時	
C80L000	0.000	19.7	-19.9	-	220
C80L100	0.100	0.0	-3.7	-16.9	-
C80S000	0.000	20.5	-16.5	-	230

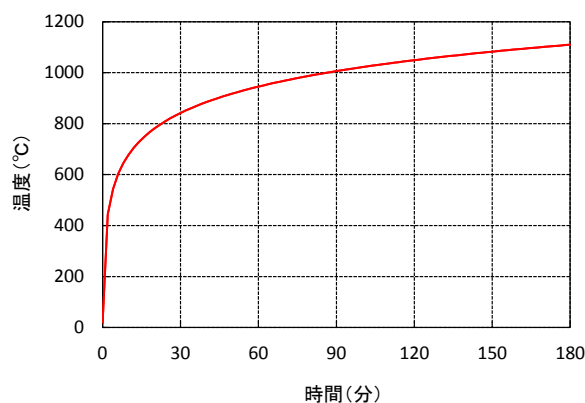


図-1 加熱温度

*1 戸田建設備技術開発センター 修士 (工学)

Research and Development Center, TODA CORPORATION, M.Eng.

付近については、解析結果と実験結果は良く一致しているが、内部については、時間経過と共に、隔たりが生じる結果となっていることが分かる。これは、コンクリート内部の水分を考慮していないことや、加熱初期から断面欠損していることが影響している

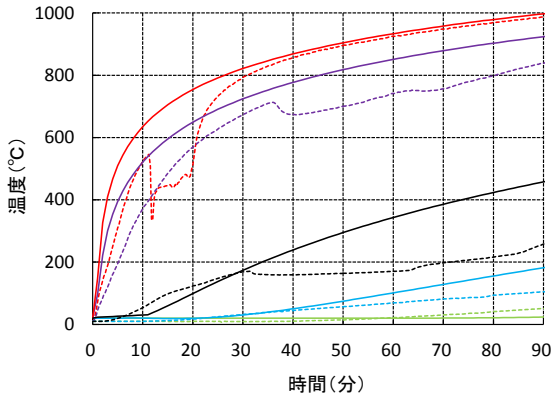


図-2 熱伝導解析結果 (C80L100)

と考えられる。

4. 熱応力解析

4.1 コンクリートのひずみ特性

荷重加熱実験のように、加熱と圧縮を同時に受けるコンクリートに生じるひずみ (全体ひずみ: ϵ_{to}) は、圧縮応力によるひずみ ϵ_c 、熱膨張によるひずみ ϵ_{th} 、クリープによるひずみ ϵ_{cr} 、および過渡ひずみ ϵ_{tr} の和である以下の式(1)で表される。

$$\epsilon_{to} = \epsilon + \epsilon_{th} + \epsilon_{cr} + \epsilon_{tr} \quad (1)$$

式(1)で示す各ひずみについて、今回の解析では、骨材の種類による違いは考慮せず、既往の文献を参考に以下の式を用いることとした。

(1) 応力とひずみの関係

応力とひずみ関係は Popovics 式を参考にして、実験結果³⁾に基づいて拡張された以下の式(2)を用いた。

$$\sigma = \sigma_{cT} \cdot \frac{\epsilon}{\epsilon_{cT}} \cdot \frac{n_T}{n_T - 1 + \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_{cT}}\right)^{n_T}} \quad (2)$$

上式におけるパラメータ σ_{cT} 、 ϵ_{cT} 、 n_T は以下の式(3)～式(6)で与えられる。

$$\frac{\sigma_{cT}}{\sigma_c} = \left\{ 0.5 \cos\left(\frac{3.14T}{1500}\right) + 0.5 \right\}^{\frac{2.5\sigma_c}{80}} \quad (3)$$

$$\frac{\epsilon_{cT}}{\epsilon_c} = 0.0025 \cdot T + 1 \quad (4)$$

$$\epsilon_c = 2.4 \cdot 10^{-5} \cdot \sigma_c + 0.00128 \quad (5)$$

$$n_T = 7.5 - 6.0 \cdot 10^{-3} \cdot T \quad (6)$$

ここで σ_c 、 ϵ_c はそれぞれ常温時のコンクリート圧縮強度および圧縮強度時ひずみである。また σ_{cT} 、 ϵ_{cT} は温度 T 時の圧縮強度および圧縮強度時ひずみである。C80L000 で使用したコンクリートの各温度での応力～ひずみ関係を図-3に示す。

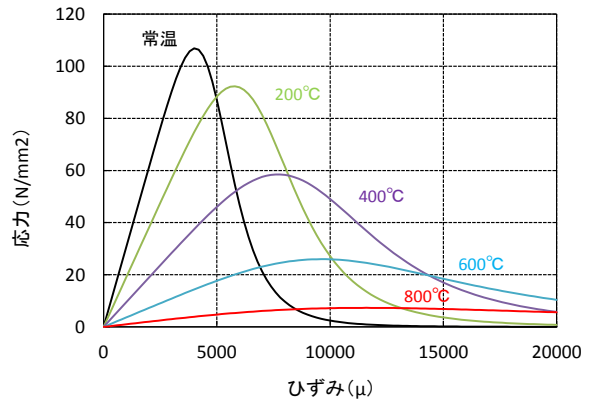


図-3 応力～ひずみ関係 (C80L000)

(2) 熱膨張ひずみ

熱膨張ひずみ ϵ_{th} は Euro Code 式を参考に数式化され、実験値に良く一致する以下の式(7)～式(8)⁴⁾を用いた。

・ $T \leq 700^\circ\text{C}$ の場合

$$\epsilon_{th} = 5.0 \cdot 10^{-6} \cdot (T - 20) + 2.3 \cdot (T - 20)^3 \quad (7)$$

・ $T > 700^\circ\text{C}$ の場合

$$\epsilon_{th} = \epsilon_{th} \cdot (700 - 20) \quad (8)$$

熱膨張ひずみと温度の関係を図-4に示す。

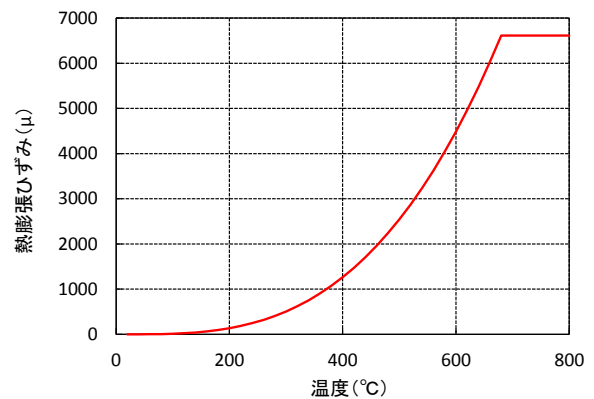


図-4 熱膨張ひずみと温度の関係

(3) 過渡ひずみ

過渡ひずみ ε_{tr} は Anderberg が示した、加熱時に収縮側に発生するひずみであり⁵⁾、熱膨張ひずみに過渡ひずみ係数 k_2 を掛けた以下の式(9)で表される。

$$d\varepsilon_{tr} = k_2 \cdot \frac{\sigma}{\sigma_c} \cdot (-d\varepsilon_{th}) \tag{9}$$

過渡ひずみ係数 k_2 については、過去の実験結果を参考にして、コンクリート強度のみの一次式とした、以下の式(10)⁶⁾を用いた。

$$k_2 = 0.037\sigma_c + 0.34 \tag{10}$$

コンクリート強度と過渡ひずみ係数の関係を図 - 5 に示す。また、C80L000 で使用したコンクリートに発生する過渡ひずみの計算値を図 - 6 に示す。

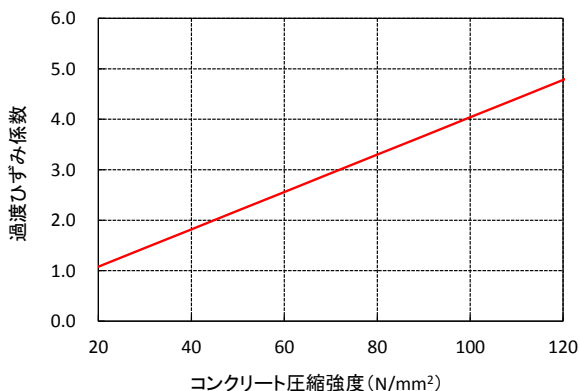


図-5 過渡ひずみ係数

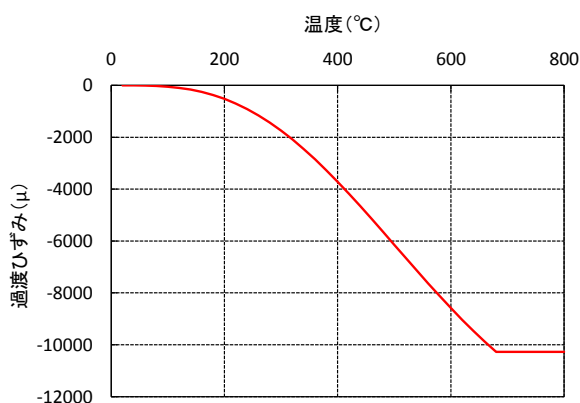


図-6 過渡ひずみ (C80L000)

(4) クリープひずみ

クリープひずみ ε_{cr} は文献(7)を参考に、以下の式(11)を用いた。

$$\varepsilon_{cr} = \beta_0 \cdot \left(\frac{t}{t_r}\right)^q \cdot \frac{\sigma}{\sigma_c} \cdot e^{\tau(T-20)} \tag{11}$$

ここに、 $\beta_0=0.00088$, $\tau=0.0026$, $t_r=300$ 分, $q=0.46$ である。各温度でのクリープひずみと時間の関係を図 - 7 に示す。

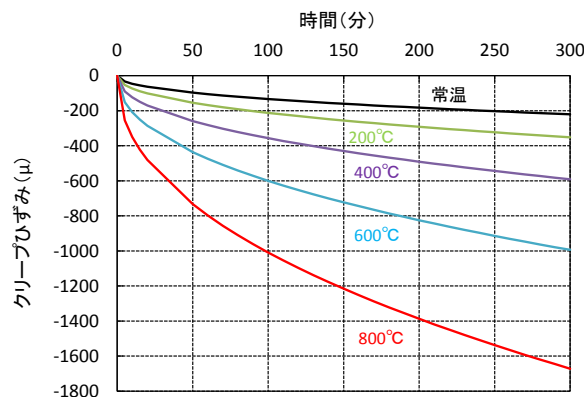


図 - 7 各温度でのクリープひずみ (C80L000)

4.1 熱応力解析結果

加熱時間と柱軸変位の関係について、図-9 に実験結果と解析結果の比較を示す。また、表-11 に実験結果と解析結果の一覧を示す。なお、図中の×印は、载荷中に崩壊に至った時点を示している。

爆裂のあった C80S000 および C80L000 については、実験と同様、加熱終了前に崩壊に至り、また崩壊時間は実験結果とはおおむね一致する結果となった。しかし、崩壊時軸変位は実験結果と隔たりがあり、特に C80L000 では、時間経過と共に収縮側へより大きく増大している。これは、熱伝導解析の際、加熱開始時点から柱断面積が減少している状態で計算を行ったため、柱内部温度が実験結果と比較して高くなったことが原因と考えられる。

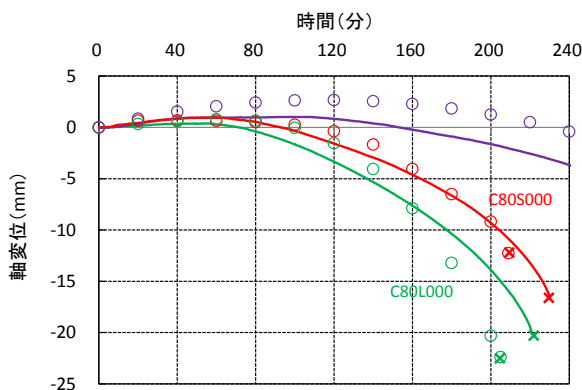


図 - 8 解析結果と実験結果の比較

表 - 2 実験結果および解析結果一覧

試験体	実験結果		解析結果	
	崩壊時間 (分)	崩壊時変位 (mm)	崩壊時間 (分)	崩壊時変位 (mm)
C80L100	—	-3.7	—	-0.4
C80S000	230	-16.5	209	-12.3
C80L000	220	-19.9	205	-22.4

5. おわりに

石灰石および硬質砂岩粗骨材を用いた超高強度 RC 柱の載荷加熱実験およびその解析から得られた知見を以下に示す。

- (1) 火災加熱を受ける RC 柱内部の温度履歴について、マスコンクリート温度応力解析用ソフトによりある程度推定が可能である。
- (2) 過去の研究結果を参考にし、熱応力解析を行うことで、改めて素材試験を行うことなく、RC 柱の耐火性能をある程度推定できると考えられる。
- (3) 今回実施した熱伝導解析および熱応力解析について、実験結果と良く一致していない部分もあり、コンクリート中の水分の影響、爆裂を考慮した解析方法等を検討することで、更なる精度向上を図る必要があると思われる。

謝辞

本報の解析に用いた実験データは、安藤ハザマ、熊谷組、佐藤工業、西松建設、フジタ、前田建設工業との共同研究として実施したものです。ここに記して、謝意を表します。

参考文献

- 1) 右田ほか：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，戸田建設技術研究報告，2016
- 2) 鎌田ほか：拘束条件を考慮した爆裂評価に関する実験的検討(その2)，日本建築学会学術講演梗概集 防火，pp.197-198，2012.9
- 3) 常世田ほか：普通コンクリートの過渡ひずみに関する実験てき研究(その2)，日本建築学会学術講演梗概集 A-2，pp.26-26，2001.9
- 4) 豊田ほか：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1)，日本建築学会学術講演梗概集 A-2，pp.171-172，2003.9
- 5) Y.Anderberg ほか：Stress and Deformation Characteristics of Concrete at Hige Temperature,Lund Institute of Techenology, Bulletin No.54, Sweden, 1976
- 6) 菊田ほか：コンクリート充填鋼管柱の耐火性に関する研究，日本建築学会構造系論文集 第 76 巻 第 664 号，pp.1171-1180，2011.6
- 7) 篠原ほか：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3)，日本建築学会学術講演梗概集 A-2，pp.73-74，2004.8