

報告 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

右田 周平*1・梅本 宗宏*2

要旨: コンクリートに対する低収縮化の要求から使用が増えている石灰石粗骨材を高強度コンクリートへ用いた場合の耐火性能については、実験的な検討や解析例は少ない。そこで、石灰石および一般的に用いられる硬質砂岩粗骨材を用いた設計基準強度 80~100N/mm² 級の高強度コンクリートにおいて、鉄筋コンクリート柱の耐火性能について解析的検討を行った。その結果、石灰石骨材を用いた高強度の鉄筋コンクリート柱においても、ポリプロピレン繊維を適切に混入することで、耐火性能を確保できることが分かった。また、解析によって、RC 柱の耐火性能を推定できることが分かった。

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

1. はじめに

高強度コンクリートは、通常の強度のコンクリートと比較して火災時に爆裂が発生しやすくなるが、ポリプロピレン繊維（以下、PP 繊維と略記）を混入することで、爆裂の発生を抑制できることが知られている¹⁾。また、近年ではコンクリートに対する低収縮化の要求から、石灰石骨材の使用例が多くなり、高強度コンクリートの領域でも石灰石粗骨材の使用例が増えている。しかしながら、骨材種類が爆裂性状や耐火性能に与える影響はかならずしも明確ではなく²⁾、石灰石粗骨材を使用した載荷加熱実験報告^{3,4)}や解析報告まだ少ないのが現状である。

本報では、石灰石および硬質砂岩粗骨材を使用した設計基準強度（以下、Fc と略記）80~100N/mm² 級の高強度鉄筋コンクリート柱の耐火性について、載荷加熱実験結果⁵⁾に関する解析による検討を行い、その結果について報告する。

2. 解析に用いた載荷加熱実験結果

2.1 実験概要

実験条件を表-1 に示す。試験体は 6 体とし、コンクリート強度と粗骨材種類をパラメータとした。コンクリートの強度は Fc80, 100N/mm² の 2 水準、粗骨材は石灰石、硬質砂岩の 2 水準とした。調合は、Fc80 N/mm² では、W/C=25.7%とし、中庸熱ポルトランドセメントを使用した。Fc 100 N/mm² では、W/C=22.0%とし、シリカフューム混入セメントを使用した。PP 繊維は、繊維長さ 10mm とし、混入量は Fc80N/mm² の石灰石粗骨材の場合で 0.000, 0.075, 0.100vol%, Fc80N/mm² の硬質砂岩粗骨材の場合で 0.000, 0.050vol%, Fc100N/mm² の硬質砂岩粗骨材の場合で 0.100vol%とした。載荷軸

力は、長期許容応力度 (Ac・Fc/3) とした。実強度は、試験体製作時に採取した供試体を材齢 4 週まで発泡スチロールの容器に入れて簡易断熱養生し、その後、封かん養生を行い、実験時に圧縮強度試験を行った結果である。軸力比は実強度に対する載荷軸力の比率である。

試験体形状および配筋・熱伝対取付位置を図-1 に示す。断面を 400mm×400mm、高さを 3,000mm、帯筋に対するかぶりを 35mm とした。主筋と帯筋の鉄筋量は、実際の建築物に合せた。また、温度測定用の熱電対を図-1 に示すコンクリート内部と主筋、帯筋に取り付けた。

コンクリートの力学的性質及び鉄筋の機械的性質をそれぞれ表-2, 表-3 に示す。コンクリートの水分率は、市販の押当型静電容量式水分計を用いて、加熱試験直前に試験体表面を測定した。

2.2 実験方法

実験は、図-2 に示す耐火炉および加力装置を使用し、図-1 に示す RC 柱に中心圧縮力を与える載荷加熱実験とし加熱区間を 2,000mm 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 時間加熱とし、その後は、自然冷却による温度条件下で加熱終了から 12 時間、

表-1 載荷加熱実験の実験条件

試験体名	Fc (N/mm ²)	実強度 (N/mm ²)	粗骨材種類	繊維混入率 (vol%)	載荷軸力 (kN)	軸力比
C80L000	80	107	石灰石	0.000	4,267	0.248
C80L075		102		0.075		0.259
C80L100		104		0.100		0.254
C80S000		114	硬質砂岩	0.000		0.234
C80S050		123		0.050		0.217
C100S100		137		0.100		5,333

*1 戸田建設（株） 技術開発センター 工修（正会員）

*2 戸田建設（株） 技術開発センター 主管 工修（正会員）

載荷を継続した。軸力の載荷は、着火 15 分前には完了することとし、崩壊、あるいは実験終了まで荷重を一定に保持した。崩壊は原則として軸力を保持できなくなる時

点とした。測定項目は炉内温度、部材温度、載荷軸力及び試験体軸変位とし、加熱中は目視による試験体観察も行った。自然冷却による温度曲線下で加熱終了から 12 時間、載荷を継続した。

2.3 実験結果

(1) 実験経過

表-4 に爆裂状況を、図-3 に加熱開始から 40 分間の試験体の温度履歴を示す。加熱時の各試験体の爆裂発生状況は、C80L000 では加熱開始後 8 分で爆裂が発生し、25 分過ぎまで激しい爆裂が続いた。C80L075 では、加熱開始 9 分で爆裂が発生し、24 分過ぎまで小規模の爆裂が断続的に発生した。C80L100 では、表層部に若干のひび割

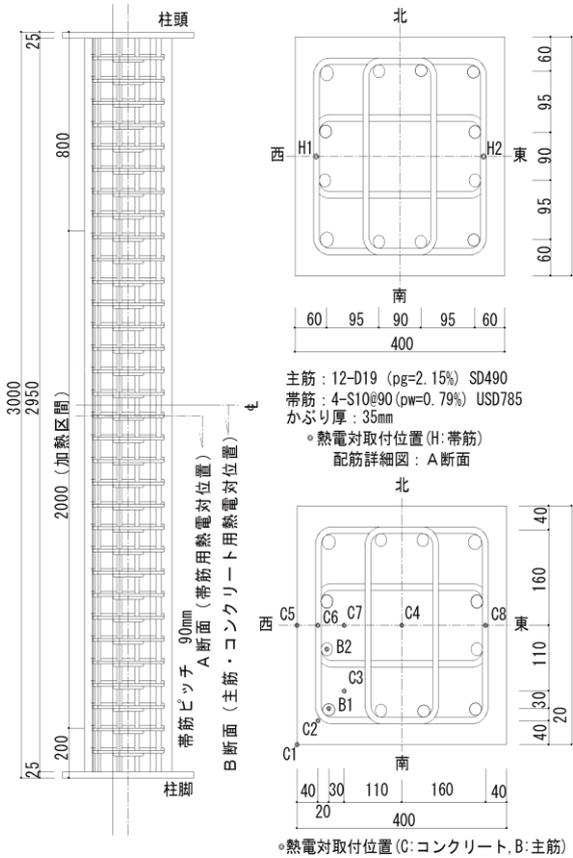


図-1 試験体形状および配筋・熱伝対取付位置図

表-2 コンクリートの力学的性質と水分率

試験体名	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)	水分率 (%)	試験材齢 (日)
C80L000	107	4.69×10 ⁴	4.8	236
C80L075	102	4.66×10 ⁴	4.9	216
C80L100	104	4.50×10 ⁴	4.8	250
C80S000	114	4.31×10 ⁴	4.6	215
C80S050	123	4.44×10 ⁴	4.7	218
C100S100	137	4.58×10 ⁴	4.4	222

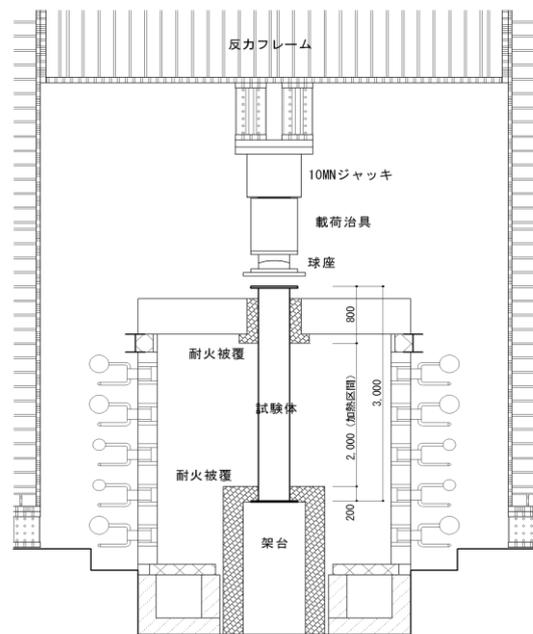


図-2 耐火炉および加力装置

表-3 鉄筋の機械的性質

鉄筋	降伏強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
主筋 D19 (SD490)	534	177500	708
帯筋 S10 (USD785)	853	201000	1031

表-4 爆裂状況と爆裂時の温度

試験体名	有無		加熱開始からの時間 (分)			爆裂開始時の温度 (°C)						最高温度 (°C)			
	爆裂発生	鉄筋露出	爆裂開始まで	爆裂終了まで	軸力保持	炉内	表面 (C1)	表面 (C5)	主筋 (B2)	帯筋 (H1)	主筋 (B2)	帯筋 (H1)	コンクリート内部		
													表面からの深さ(mm)		
C80L000	有	有	8	25	222	638	394	247	21.6	32.8	848	979	1052	516	427
C80L075	有	有	9	24	終了まで	673	499	353	18.8	33.6	532	617	650	431	397
C80L100	無	無	-	-	終了まで	-	-	-	-	-	506	583	650	396	374
C80S000	有	有	7	21	231	617	383	241	20.9	31.4	755	972	1025	578	493
C80S050	有	有	10	25	終了まで	665	×	335	33.4	54.0	663	772	698	499	472
C100S100	有	無	11	18	終了まで	685	310	370	28.5	54.3	659	899	898	449	437

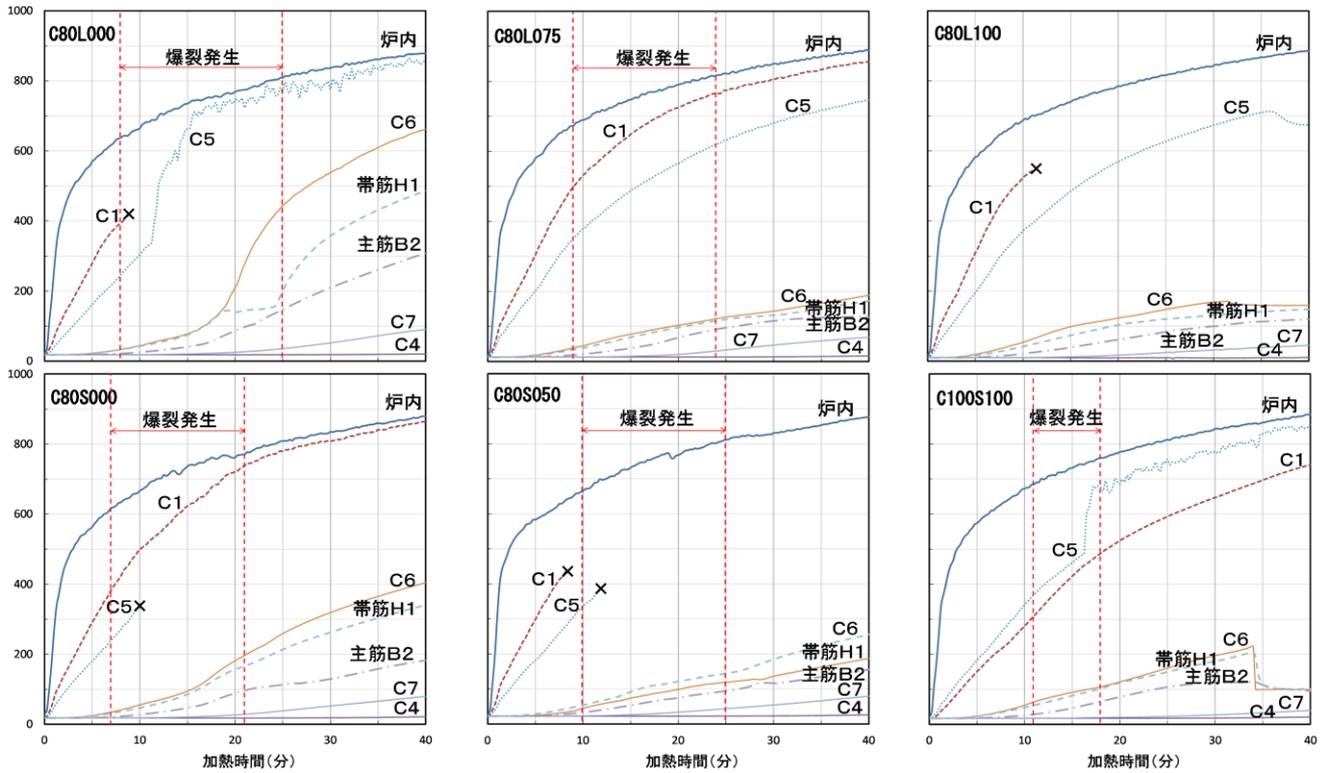


図-4 試験体の温度履歴（加熱開始後40分まで）

れが生じたが、爆裂は生じなかった。C80S000では、加熱開始7分で爆裂が発生し、21分過ぎまで激しい爆裂が続き、それ以降も小規模な爆裂が断続的に発生した。C80S050では、加熱開始10分から爆裂が発生し、25分過ぎまで続いた。また、C100S100では、加熱開始11分で爆裂が生じ、18分過ぎまで小規模な爆裂が発生した。

爆裂開始時の温度は炉内で617～685℃、柱出隅部分(C1)では383～499℃、柱中央部分(C5)で241～370℃であった。

C80L000とC80S000の比較より、粗骨材の違いによる爆裂開始時の温度の違いは見られなかった。繊維混入率が高くなるに従い、爆裂開始温度は高くなった。試験終了時まで軸力保持できなかった試験体の温度は、軸力保持できた試験体の温度より、表面から深さ40mmのコンクリート(C6)と帯筋(H1)で最大約400℃、主筋(B2)で最大約340℃高くなっていた。逆に、深さ90mm(C7)での温度差は、最大で180℃程度であった。

(2) 爆裂性状

写真-1に载荷加熱実験終了後の試験体状況を、図-5に爆裂深さの測定結果を示す。爆裂深さは、試験体加熱区間の側面を50mmにメッシュ割りし、各メッシュの爆裂深さをデジタルノギスにて測定した。

加熱終了後の爆裂状況は、C80L000では、ほぼ全面にわたって爆裂が生じており、中央部の広範囲で帯筋(かぶり厚さ35mm)が露出していた。C80L075では、爆裂範囲、爆裂深さともに小規模にとどまった。C80S000では、広



写真-1 载荷加熱実験終了後の試験体状況

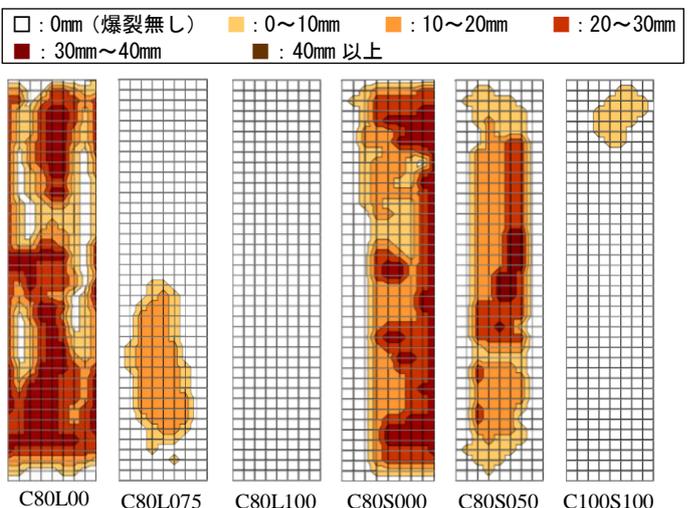


図-5 爆裂深さの測定結果

範囲で深さ 10mm～30mm 程度の爆裂が生じており、帯筋の露出も散見された。PP 繊維無混入の 80L000 と C80S000 を比較すると、爆裂の程度は C80S000 の方が小規模であった。これは、使用している骨材の違いによると考えられる。C80S050 については、中央付近で数か所、帯筋が露出していたが、C80S000 と比べて、爆裂範囲、深さ共に小規模であった。また、C100S100 では、爆裂範囲は狭く、深さも平均で 1mm 程度であった。

以上の結果より、Fc80N/mm² の RC 柱については、骨材種類にかかわらず、PP 繊維を混入することで爆裂の発生を抑制でき、0.100vol%以上混入することで、爆裂を完全に抑制できると考えられた。また、Fc100 N/mm² の RC 柱については、PP 繊維を 0.100vol%以上混入することで、爆裂の発生を軽微に抑えることができると考えられた。

図-8 に平均爆裂深さと PP 繊維混入量の関係を示す。本実験結果では、PP 繊維混入量と平均爆裂深さに式(1)に示すような線形な関係が存在していることが分かる。

$$d = -\frac{V_p}{0.005} + 20 \quad (1)$$

本研究内の限られた範囲であ
るが、RC 柱の爆裂深さ

は、骨材種類やコンクリート強度に依らない、PP 繊維混入量 V_p vol% による単純な一次式(1)で推定できる可能性がある。

(3) 耐火性能

表-10 に実験結果一覧を、図-7 に加熱時間と柱軸変形の関係を示す。図中の×印は、载荷中に崩壊に至った時点を示している。

PP 繊維無混入の試験体はいずれも加熱終了時間前に崩壊に至った。C80L000 は加熱開始から 56 分で膨張が止まり、220 分で崩壊に至り、崩壊時の変位は-19.9mm であった。また、C80S000 は加熱開始 59 分で膨張が止まり、230 分で崩壊に至り、崩壊時の変位は-16.5mm であった。载荷終了まで崩壊には至らず、载荷終了時の各試験体の変位は、C80L075 で-21.4mm、C80L100 で-16.9mm、C80S050 で-28.6mm、C100S100 で-23.7mm であった。また、全ての試験体が 3 時間耐火柱の目安となる 216 分の耐火時間を満足した。

3. 解析的検討

3.1 解析概要

爆裂の生じなかった C80L100 および、過熱中に崩壊に至った C80S000、C80L000 について、解析により耐火性能の推定が可能かどうか検討した。解析では、始めに熱伝導解析による柱内部温度の推定を行い、その解析結果を用いて、熱応力解析による RC 柱の耐火性能を推定し

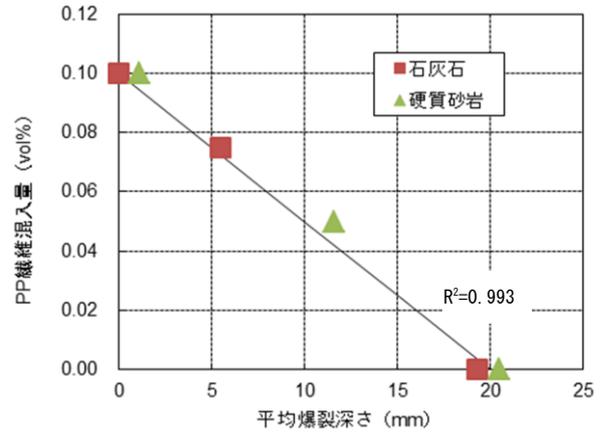


図-6 平均爆裂深さと PP 繊維混入量の関係

表-10 実験結果一覧

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	载荷終了時	
C80L000	0.000	19.7	-19.9	-	220
C80L075	0.075	5.5	-5.4	-21.4	-
C80L100	0.100	0.0	-3.7	-16.9	-
C80S000	0.000	20.5	-16.5	-	230
C80S050	0.050	11.6	-7.1	-28.6	-
C100S100	0.100	1.1	-5.6	-23.7	-

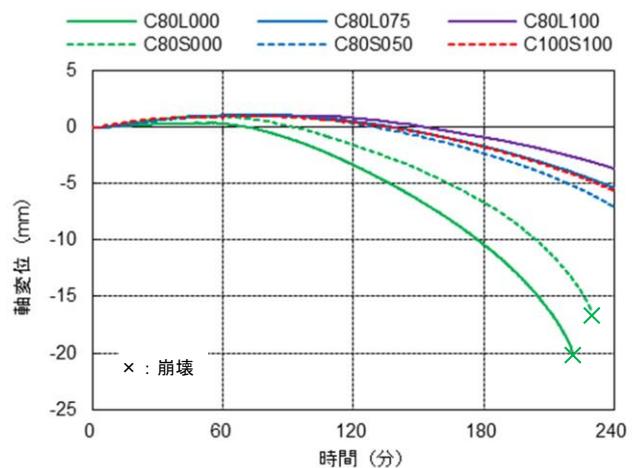


図-7 加熱時間と柱軸変位の関係

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、爆裂については、表層部にあるメッシュの幅を調整し、断面全体が、解析開始時点から、表-10 に示す平均爆裂深さ分だけ減少しているものとして解析を行った。

3.2 熱伝導解析

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プログラムを使用した。加熱は 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達率、比熱は鎌田らの研究⁶⁾を参考に、

実験結果と合うように、それぞれ $150\text{W/m}^2\cdot\text{K}$, $0.9\text{W/m}\cdot\text{K}$, $0.9\text{kJ/kg}\cdot\text{K}$ とした。解析結果と実験結果の一例を図-8に示す。コンクリート表層付近については、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た。

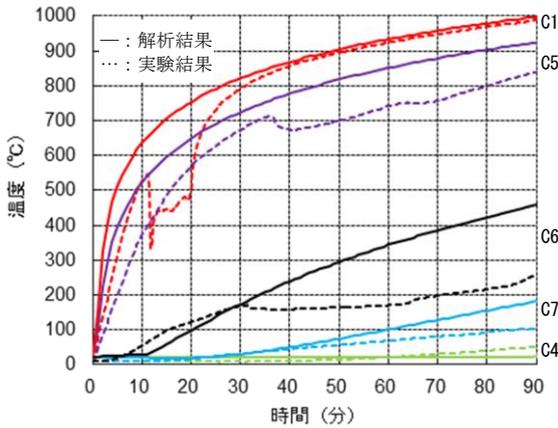


図-8 熱伝導解析結果 (C80L100)

3.3 熱応力解析

熱伝導解析により得られた結果を用いて、熱応力解析にてRC柱の耐火性能を推定した。熱応力解析には千葉大学製熱応力解析プログラムを用いた。

3.4 コンクリートのひずみ特性

加熱と圧縮を受けるコンクリートに生じる全体ひずみ ε_{to} は、圧縮応力によるひずみ ε , 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} の輪である以下の式(2)で表される。

$$\varepsilon_{to} = \varepsilon + \varepsilon_{th} + \varepsilon_{cr} + \varepsilon_{tr} \quad (2)$$

(2)式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した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~ひずみ関係はPopovics式を参考に、実験結果⁷⁾に基づいて拡張された以下の式(3)を用いた。

$$\sigma = \sigma_{cT} \cdot \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{cT}} \cdot \frac{n_T}{n_T - 1 + \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{cT}}\right)^{n_T}} \quad (3)$$

上式におけるパラメータ σ_{cT} , ε_{cT} , n_T は以下の式(4)~式(7)で与えられる。

$$\frac{\sigma_{cT}}{\sigma_c} = \left\{ 0.5 \cos\left(\frac{3.14T}{1500}\right) + 0.5 \right\}^{\frac{2.5\sigma_c}{80}} \quad (4)$$

$$\frac{\varepsilon_{cT}}{\varepsilon_c} = 0.0025 \cdot T + 1 \quad (5)$$

$$\varepsilon_c = 2.4 \cdot 10^{-5} \cdot \sigma_c + 0.00128 \quad (6)$$

$$n_T = 7.5 - 6.0 \cdot 10^{-3} \cdot T \quad (7)$$

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。

また、コンクリートの高温時の圧縮強度時ひずみおよび強度低下率については、文献(8)を参考とし、それぞれ以下の式(8)および式(9)を用いた。

$$\varepsilon_{cT} = \varepsilon_c + bT \quad (8)$$

$$\sigma_{cT} = \sigma_c' - cT \quad (9)$$

ここに、 $b=0.0025 \varepsilon_c$, $C=0.0016 \sigma_c - 0.033$

(2) 熱膨張ひずみ

熱膨張ひずみ ε_{th} はEuroCode式を参考に数式化され、実験値に良く一致する以下の式(10)~式(11)⁹⁾を用いた。

・ $T \leq 700^\circ\text{C}$ の場合

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

・ $T > 700^\circ\text{C}$ の場合

$$\varepsilon_{th} = \varepsilon_{th} \cdot (700 - 20) \quad (11)$$

(3) 過渡ひずみ

過渡ひずみ ε_{tr} はAnderbergによって見出された¹⁰⁾、収縮側に発生するひずみであり、熱膨張ひずみに過渡ひずみ係数 k_2 を掛けた以下の式(12)で表される。

$$d\varepsilon_{tr} = k_2 \cdot \frac{\sigma}{\sigma_c} \cdot (-d\varepsilon_{th}) \quad (12)$$

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(13)⁸⁾を用いた。

$$k_2 = 0.037\sigma_c + 0.34 \quad (13)$$

(4) クリープひずみ

クリープひずみ ε_{cr} は文献(11)を参考に、以下の式(10)を用いた。

$$\varepsilon_{cr} = \beta_0 \cdot \left(\frac{t}{t_r}\right)^q \cdot \frac{\sigma}{\sigma_c} \cdot e^{\tau(T-20)} \quad (14)$$

ここに、 $\beta_0=0.00088$, $\tau=0.0026$, $t_r=300$ 分 , $q=0.46$

3.5 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に解析結果の一例を示す。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、載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。

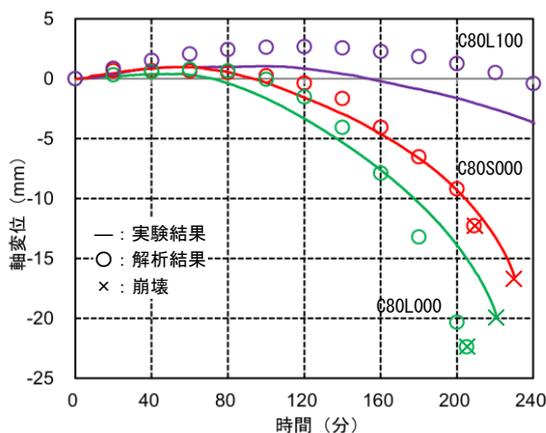


図-9 解析結果

表-11 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

*: C80L000 については 240 分での変位

4. おわりに

石灰石および硬質砂岩粗骨材を用いた本検討より、得られた知見を以下に示す。

- (1) $F_c 80 \text{ N/mm}^2$ の RC 柱については、骨材種類にかかわらず、PP 繊維を混入することで爆裂の発生を抑制でき、0.100vol%以上混入することで、爆裂を完全に抑制できる。
- (2) $F_c 100 \text{ N/mm}^2$ の RC 柱については、PP 繊維を 0.100vol%以上混入することで、爆裂の発生を軽微に抑えることができる。
- (3) $F_c 80 \text{ N/mm}^2 \sim 100 \text{ N/mm}^2$ の RC 柱について、PP 繊維混入量のみで爆裂性状を推定できる可能性がある。また、推定結果から、過去の研究結果を参考に熱伝導解析および熱応力解析を行うことで、RC 柱の耐火性能をある程度推定できると考えられる。

- (4) 今回の解析結果は、実験結果と良く一致していない部分もあり、爆裂を考慮した解析方法について検討を進め、解析精度の更なる向上を図る必要があると考えられる。

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) 例えば森田ほか：火災時における高強度コンクリート部材の爆裂性状の改善に関する実験的研究，日本建築学会構造系論文集，pp.171-178，No.544，2001.6
- 2) 日本建築学会：構造材料の耐火性ガイドブック，pp.99-100，2009
- 3) 黒岩ほか：ポリプロピレン繊維を用いた高強度 RC 柱の耐火性能，日本建築学会大会学術講演梗概集 A-2，pp.35-36，2001.9
- 4) 森田ほか：高強度鉄筋コンクリートの耐火性に関する実験的検討，日本火災学会研究発表会概要集，pp.118-119，2014.5
- 5) 梅本ほか：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（その 1~5），日本建築学会大会学術講演梗概集 防火，pp.53-62，2015.9
- 6) 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
- 7) 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
- 8) 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
- 9) 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
- 10) Y.Anderberg ほか：Stress and Deformation Characteristics of Concrete at High Temperature, Lund Institute of Technology, Bulletin No.54, Sweden, 1976
- 11) 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