

# ポルトランドセメントを使用しない 超低収縮・高強度コンクリートの実用化に向けた検討 —その6 実大 RC 柱の載荷加熱試験—

## Examination on Practical Use of Ultra-low Shrinkage and High Strength Concrete without Portland Cement - Part6 Loaded Fire Resistance Test of Full-size RC Column -

R&D センター	峯 竜一郎	RYUICHIRO MINE
R&D センター	坂本 遼	RYO SAKAMOTO
R&D センター	小宮 克仁	KATSUHITO KOMIYA
R&D センター	松田 拓	TAKU MATSUDA

ポルトランドセメントを使用しない超低収縮・高強度コンクリートの実用化を目的に、プレキャスト工場の実機ミキサを用いて実大スケールの RC 柱 (430×430×h3,500mm) を作製し、載荷加熱試験を実施することでその耐火性能を確認した。載荷による柱の軸圧縮応力は設計基準強度 ( $F_c=60\text{N/mm}^2$ ) の 1/3 とし、標準加熱温度曲線 A (ISO834-1) に準拠した 60 分加熱を実施した。試験の結果、爆裂の影響でかぶりコンクリートが剥離し、一部で鉄筋が露出する箇所が確認されたものの、軸方向収縮量と軸方向収縮速度のどちらも判定基準値以下となり、60 分の耐火性能を確認した。

**キーワード**：ポルトランドセメント不使用，低環境負荷，プレキャスト部材コンクリート，  
高強度コンクリート，実大載荷加熱試験

The purpose of this paper is to use ultra-low-shrinkage, high-strength concrete without Portland cement for actual structure. Full-scale RC columns (430 × 430 × h3,500 mm) were manufactured using an actual mixer in a precast concrete factory. Fire resistance performance of the RC columns was confirmed by loaded fire resistance tests. The RC columns were heated for 60 minutes according to the standard heating temperature curve A (ISO834-1). Axial compressive stress was 1/3 of the design standard strength ( $F_c=60\text{N/mm}^2$ ). As a result of the tests, it was confirmed that explosion phenomenon occurred during heating and some rebars were partially exposed due to being peeled off cover concrete. The amount of deformation in the axial direction and the rate of deformation in the axial direction were below the judgment standard values, confirming that the 60-minute fire resistance was secured.

**Key Words**: Non-Portland cement, Low environmental impact, Concrete for precast members,  
High strength concrete, Loaded fire resistance test of full-size column

### 1.はじめに

近年、カーボンニュートラル社会の実現に向けて世界中で様々な取り組みが行われており、二酸化炭素削減の重要性が認識されている。その中でもコンクリートにおいては、その構成材料においてポルトランドセメント（以下、単にセメントと呼ぶ）の製造時における二酸化

炭素排出量が極めて多いことが知られており、セメントを使用しない条件においても製造可能な超低収縮・高強度コンクリート（以下、STC と称す）が開発されている<sup>1),2)</sup>。

著者らは、STC のうちセメントを使用しない調査 (STC-RDC) を対象に、プレキャスト部材としての実用化を検討しており、室内試験によって力学特性、耐久

表-1 使用材料

記号	種類	物性等
BFA	高炉スラグ微粉末（石膏入り）	密度：2.88g/cm <sup>3</sup> ，比表面積：4,400cm <sup>2</sup> /g
FA	フライアッシュ	密度：2.40g/cm <sup>3</sup> ，比表面積：5,680cm <sup>2</sup> /g
SF	シリカフューム	密度：2.26g/cm <sup>3</sup> ，比表面積：200,000cm <sup>2</sup> /g
EX	膨張材	密度：3.17g/cm <sup>3</sup> ，比表面積：5,000cm <sup>2</sup> /g
FNS	フェロニッケルスラグ細骨材	表乾密度：2.98g/cm <sup>3</sup> ，粗粒率：2.60
HG	硬質砂岩碎石2005	表乾密度：2.63g/cm <sup>3</sup> ，実積率：59.0%
W	水	密度：1.00g/cm <sup>3</sup>
SP	高性能減水剤1種	ポリカルボン酸系
PP2	ポリプロピレン繊維	密度：0.91g/cm <sup>3</sup> ，繊維長さ：2mm，繊維径：18μm
DRA	鋼繊維	密度：7.85g/cm <sup>3</sup> ，繊維長さ：30mm，繊維径：0.62mm

表-2 コンクリートの調合条件

NO.	記号	W/B [%]	s/a [%]	目標スランプフロー [cm]	空気量 [%]	W [kg/m <sup>3</sup> ]	Bの質量比率 [BFA:FA:SF:EX]	EX [kg/m <sup>3</sup> ]	S	G	繊維混入率 [vol%]	
											PP	sf
1	STC-RDC-1.0	15.0	60.4	60±10	3.5	130	0.537:0.293:0.147:0.023	20	FNS	HG	0.33	1.0
2	STC-RDC-0.5										0.33	0.5

表-3 フレッシュ試験結果と載荷加熱試験時の物性値

NO.	記号	フレッシュ試験結果				載荷加熱試験時の物性値		
		SP添加率 [B×%]	スランプフロー [cm]	空気量 [%]	練上がり温度 [°C]	乾燥期間 [日]	圧縮強度 <sup>*1</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]	含水率 <sup>*2</sup> [%]
1	STC-RDC-1.0	1.25	67.8	3.3	28	124	85.9	3.78
2	STC-RDC-0.5	1.10	60.9	3.4	27	128	84.9	3.50

※1 部材同一養生の円柱供試体の圧縮強度

※2 部材同一断面（430×430×h1000mm）の中心部コア（φ100×200）の含水率

性等の基本的な性状を確認している<sup>3),4)</sup>。また、プレキャスト工場の実機ミキサを用いた実機試験を行い、通年（夏期，標準期，冬期）で製造可能であることを確認している<sup>5)</sup>。本報は、STC-RDCを用いて製造した構造部材の耐火性能を確認することを目的とし、STC-RDCの実大RC柱を製作し、載荷加熱試験を実施した結果を報告するものである。

## 2. 試験概要

### （1）使用材料とコンクリートの調合条件

使用材料を表-1に示す。結合材（B）はブレン法による比表面積が4000相当の高炉スラグ微粉末（BFA），フライアッシュ（FA），シリカフューム（SF），膨張材（EX）とした。細骨材はフェロニッケルスラグ細骨材（FNS），粗骨材は最大粒径が20mmの硬質砂岩碎石（HG）とした。高性能減水剤（SP）は、主成分がポリカルボン酸系のものを使用した。また、耐火性能向上を目的とし、合成繊維（PP2）と鋼繊維（DRA）を使用している。合成繊維は、従来の高強度コンクリートの耐火爆裂防止対策として使用される、繊維長さが2mmのポリプロピレン繊維とした<sup>6)</sup>。鋼繊維は、その補強効果による爆裂時のかぶりコンクリートの剥離防止を期待し、繊維長さが30mmのフック型のものとした。

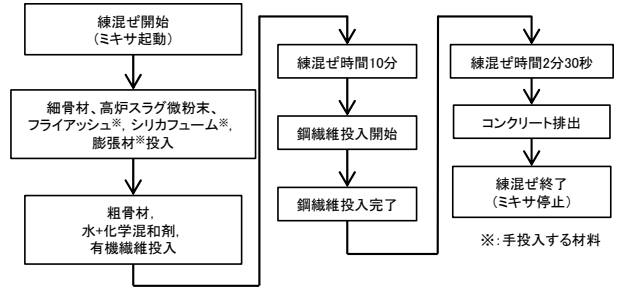
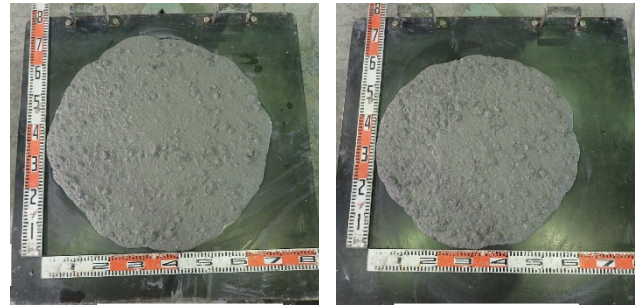


図-1 練混ぜ手順



STC-RDC-1.0

STC-RDC-0.5

写真-1 スランプフロー試験後の状況



写真-2 打込み状況



写真-3 打込み完了後

コンクリートの調合条件を表-2に示す。水結合材比（W/B）を15.0%，単位水量を130kg/m<sup>3</sup>とし、結合材における各粉体の質量比率は表中に記載の値である。目標設計基準強度（F<sub>c</sub>）は60N/mm<sup>2</sup>とした。繊維混入率は既報の小型試験体を用いた爆裂試験の結果<sup>4)</sup>を参考に、2水準（STC-RDC-1.0とSTC-RDC-0.5）とした。両試験体の合成繊維の混入率（PP）は0.33vol%とし、鋼繊維の混入率（sf）はSTC-RDC-1.0は1.0vol%，STC-RDC-0.5は0.5vol%とした。なお、合成繊維と鋼繊維はどちらも体積外割りで混入した。練混ぜは図-1に示す手順で実施した。目標スランプフローは60±10cm，目標空気量は3.5±1.5%とした。

### （2）フレッシュ性状と載荷加熱試験時の物性値

フレッシュ試験結果と載荷加熱試験時の物性値を表-3に、スランプフロー試験後の状況を写真-1に示す。スランプフローと空気量は目標値の範囲内となり、目視の範囲で繊維の分散状況は良好であった。また、後述する載荷加熱試験時の物性値（圧縮強度と含水率）は、STC-RDC-1.0とSTC-RDC-0.5で大きな違いはなかった。

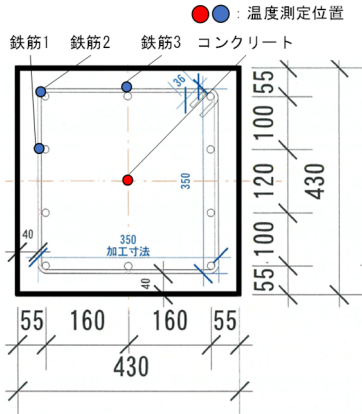


図-2 試験体断面

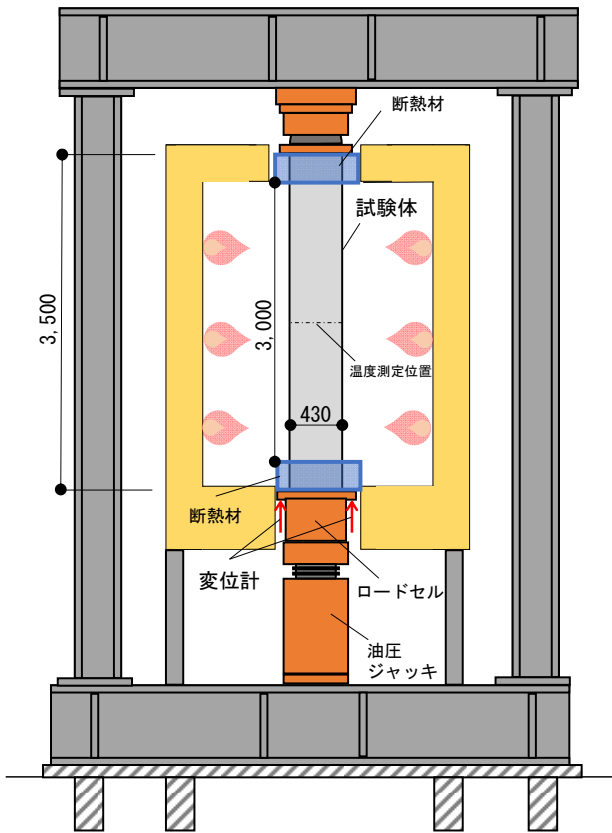


図-3 試験装置の概要

### (3) 荷重加熱試験体

RC 柱試験体の断面寸法と温度測定位置を図-2 に示す。断面寸法は 430×430mm とし、配筋は主筋：10-D13 (SD345)、帯筋：2-D6 (SD295@50) とした。試験体高さ (h) は 3,500mm、コンクリートのかぶり厚さは 40mm とした。試験体のコンクリート打込み時の状況を写真-2 に、打込み完了後を写真-3 に示す。打込みにはホッパーを用い、棒型振動機で締固めを行った。打込み完了後、乾燥防止のために打込み面をラップで覆い、6面を厚さ 200mm の断熱材で覆った状態で打ち込みから 21 日まで養生した。その後、脱枠し、雨がかりのない



STC-RDC-1.0

STC-RDC-0.5

写真-4 荷重加熱試験後の試験体外観

屋内で気中養生とした。

### 3. 試験方法

試験装置の概要を図-3 に示す。試験は文献<sup>7)</sup>「4.1 耐火性能試験方法」に準拠した。試験体は加熱炉内に垂直に設置して上下端を固定支持とした。荷重荷重 N は、軸力比 ( $N/(A_c \times F_c)$ ,  $A_c$ :断面積 ( $\text{mm}^2$ ), 設計基準強度  $F_c=60\text{N/mm}^2$ ) で 0.33 とした。

荷重荷重は加熱前に荷重し、加熱終了後も自然冷却させて加熱時間の 3 倍の時間 (180 分) 荷重を保持した。試験体の加熱部分は長さ 3,500mm のうち 3,000mm とし、ISO-834 「建築構造部材の耐火試験方法」<sup>8)</sup>に規定される標準加熱温度曲線に従って加熱した。荷重荷重は油圧ジャッキに取り付けたロードセルにより測定した。また、試験体の軸方向変位を変位計によって測定した。変位計は図-4 に示す位置で荷重板の隅角部 (4 点) の変位を測定し、その平均値を判定基準値としている。耐火性能の評価は、測定値が次に示す 2 つの式で計算された値以下であることを判定基準とした。

①最大軸方向収縮量 ( $h / 100 = 35 \text{ mm}$ )

②最大軸方向収縮速度 ( $3 \times h / 1000 = 10.5 \text{ mm/分}$ )

温度測定は試験体高さの中心部の位置 (下端から 1,750mm) とした。図-2 に示すように、熱電対を用い、

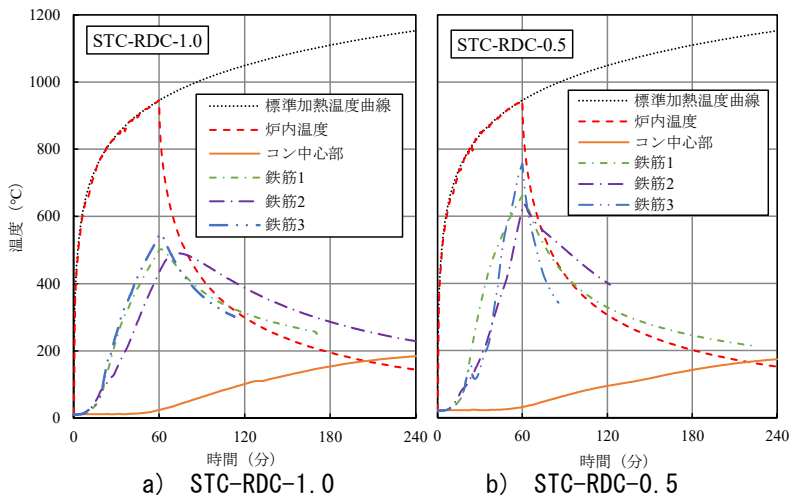


図-4 温度測定結果

鉄筋温度（隅角部（図中鉄筋2），側面部（図中鉄筋1，3）），コンクリート内部温度，炉内温度を計測した。

#### 4. 実験結果

載荷加熱試験終了後の試験体外観を写真-5に示す。STC-RDC-0.5とSTC-RDC-1.0のどちらも爆裂音は加熱開始から約8分で発生し，その後断続的に続いた。加熱開始約35分で，大きな爆裂音とともに側面部のかぶりコンクリートの剥落が確認された。その後，加熱終了の60分まで，断続的に爆裂音がしていた。試験終了時の240分まで計測・観察を行ったが，加熱終了後に爆裂の発生は確認されなかった。写真-5を見ると，隅角部よりも側面部の剥落が多くなっており，一部で主筋と帯筋の露出が確認された。また，STC-RDC-0.5よりもSTC-RDC-1.0のほうが目視の範囲でかぶりコンクリートが多く残っていた。どちらも過大な変形は見られなかった。

温度測定結果を図-4に示す。60分の加熱終了後，荷重を保持した状態で180分間まで軸方向の変位を測定した結果（合計240分）を示している。

STC-RDC-1.0に着目すると，鉄筋の温度上昇は，隅角部（鉄筋2）の方が側面部（鉄筋1，3）より遅くなる傾向が見られた。側面部は加熱終了時点に，隅角部は加熱終了から約12分後に最高温度に達した。最高温度は鉄筋1，2，3でそれぞれ，503，491，549°Cだった。平面部の鉄筋温度は，隅角部よりも高くなっており，かぶりコンクリートの剥落は，平面部の方が早かったと推察される。中心部のコンクリート温度は緩やかに上昇し，最高温度は試験終了時の184°Cだった。

STC-RDC-0.5に着目すると，鉄筋1,2,3の温度上昇勾配はSTC-RDC-1.0と比べて大きくなった。これは，

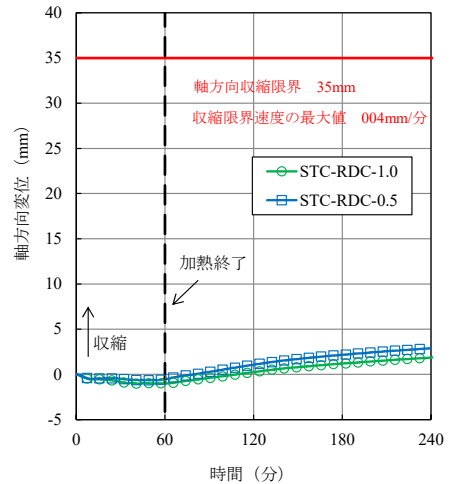


図-5 軸方向変位測定結果

STC-RDC-0.5の鋼繊維混入率はSTC-RDC-1.0と比べ小さくなっているため，爆裂によるかぶりコンクリートの剥離が多くなり，鉄筋が直接加熱される時間が長くなったことによるものと考えられる。鉄筋の温度は，加熱終了時点が最も高く，鉄筋1，2，3でそれぞれ，663，637，756°Cであり，STC-RDC-1.0と比べて最高温度は高くなっている。

軸方向変位測定結果を図-5に示す。軸方向収縮量の最大値は，STC-RDC-1.0とSTC-RDC-0.5でそれぞれ1.9，2.9 mmであり，判定基準値を超えなかった。軸方向収縮速度の最大値は，STC-RDC-1.0とSTC-RDC-0.5のどちらも0.04 mm/分であり，判定基準値を下回った。

軸方向収縮量と軸方向収縮速度のどちらの判定基準値以下となり，STC-RDCは60分の耐火性能を確保できることが確認された。

#### 5. まとめ

ポリプロピレン繊維と鋼繊維を混入したポルトランドセメントを使用しない超低収縮・高強度コンクリート(STC-RDC)を用いて製作した実大RC柱の載荷加熱試験を実施し，本実験の範囲内で以下の知見を得た。

- ①60分の耐火性能が確保された。
- ②鋼繊維を1.0 vol%混入したものは，0.5 vol%混入したものより爆裂による損傷が低減された。

謝辞：本実験を行うにあたり，東京大学大学院工学系研究科 野口貴文教授にご助言をいただきました。また，日本シーカ㈱にご協力いただきました。ここに記して感謝いたします。

#### 参考文献

- 1) 松田拓ほか：ポルトランドセメントを使用しない超低収縮・高強度コンクリート，日本建築学会大会学術講演梗概集（中国），pp.369-370，2017.8
- 2) 松田拓：超低収縮・低炭素・低発熱・高強度・高流動を副産物で実現した高性能コンクリート，コンクリート工学，Vol. 59, No.9, pp.788-793，2021.9
- 3) 坂本遼ほか：ポルトランドセメントを使用しない超低収縮・高強度コンクリートの実用化に向けた検討―その1 力学特性と収縮性状―，三井住友建設技術研究開発報告，第20号，pp27-32，2022.10
- 4) 小宮克仁ほか：ポルトランドセメントを使用しない超低収縮・高強度コンクリートの実用化に向けた検討―その2 中性化抵抗性と爆裂性状―，三井住友建設技術研究開発報告，第20号，pp33-38，2022.10
- 5) 峯竜一郎ほか：ポルトランドセメントを使用しない超低収縮・高強度コンクリートの実用化に向けた検討―その3 実機ミキサを使用した製造実験―，三井住友建設技術研究開発報告，第20号，pp39-44，2022.10
- 6) 公益社団法人日本コンクリート工学会：高温環境化におけるコンクリートの性能評価に関する研究委員会報告書，2017.9
- 7) 一般財団法人 日本建築総合試験所：防耐火性能試験・評価業務方法書
- 8) ISO-834：建築構造部分の耐火試験方法