

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5 長期材齢における爆裂試験結果—

Examination on Practical Use of Ultra-low Shrinkage and High Strength Concrete without Portland Cement -Part5 Explosion Test Result in Long-term Age-

R&Dセンター 小宮 克仁 KATSUHITO KOMIYA
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 松田 拓 TAKU MATSUDA

本報では、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とし、火災加熱を受けた際の爆裂性状を確認した。ポリプロピレン繊維と鋼繊維を所定量混入した供試体に対し材齢約3か月と1年において爆裂試験を実施し、材齢の経過が強度発現と爆裂性状に与える影響を確認した。実験の結果、繊維の混入により爆裂による損傷は低減された。また、爆裂による損傷は強度増進に伴い小さくなる傾向が得られた。

キーワード：低環境負荷，耐火，爆裂，鋼繊維，ポリプロピレン繊維

In this report, the explosion property under fire condition was investigated for the purpose of practical application of ultra-low shrinkage and high strength concrete without Portland cement. Explosion tests were carried out on small specimens containing a specified amount of polypropylene fiber and steel fiber at ages around 3 months or 1 year. From the test results, authors investigated as to the effect of strength gain to the explosion properties. As a result, the damage caused by the explosion was reduced due to containing fibers. It was also confirmed that the spalling was reduced due to compressive strength gain of concrete as well.

Key Words: Low environmental impact, Fire resistance, Explosion, Steel fiber, Polypropylene fiber

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（セメント）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いる¹⁾。そのような背景の中、筆者らは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（サスティンクリート（STC））を開発している^{2),3)}。本論文では、STCのうちセメントを使用しない調合（以下、STC-RDCと称す）

を対象とし、プレキャストコンクリート部材としての実用化を目的に、火災加熱を受けた際の爆裂性状に及ぼす、強度増進の影響を爆裂試験により確認した。すなわち、ポリプロピレン繊維と鋼繊維を所定量混入した供試体を用いて材齢 91,92 日⁴⁾、および 364,365 日で強度発現と爆裂性状を確認した。

2. 試験条件

コンクリートの使用材料を表-1 に、調合条件を表-2 に示す。STC-RDC は結合材（B）を高炉スラグ微粉末（BFA）、フライアッシュ（FA）、シリカフェーム（SF）、

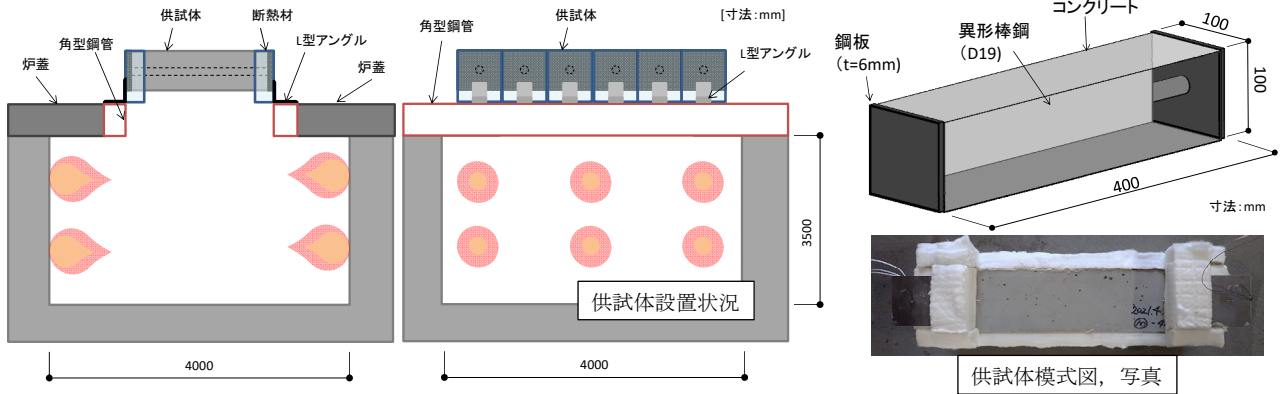


図-1 実験に使用した耐火炉の模式図

表-1 使用材料

種類	記号	種類	物性等
STC-RDC	BFA	高炉スラグ微粉末 (石膏入り)	密度: 2.88g/cm ³ , 比表面積: 4,400cm ² /g SO ₃ 量2.1%
	FA	フライアッシュ	密度: 2.40g/cm ³ , 比表面積: 5,680cm ² /g
	SF	シリカフェウム	密度: 2.26g/cm ³ , 比表面積(BET法): 200,000cm ² /g
	EX	膨張材	密度: 3.17g/cm ³ , 比表面積: 5,000cm ² /g
	FNS	フェロニッケルスラグ細骨材	表乾密度: 2.98g/cm ³ , 粗粒率: 2.60
	HG	硬質砂岩砕石2005	表乾密度: 2.63g/cm ³ , 実積率: 59.0%
	W	上水道水	密度: 1.00g/cm ³
	SP1	高性能減水剤 I 種	ポリカルボン酸系
	AF	空気量調整剤	アルキルエーテル系
	PP2	ポリプロピレン繊維	密度: 0.91 g/cm ³ , 繊維長さ: 2mm, 繊維径: 18μm
	F15	鋼繊維	密度: 7.85 g/cm ³ , 繊維長さ15mm, 繊維径: 0.2mm
	DRA	鋼繊維	密度: 7.85 g/cm ³ , 繊維長さ30mm, 繊維径: 0.62mm

表-2 調合条件

試験体名	W/B [%]	s/a [%]	目標スランプフロー [cm]	空気量 [%]	W [kg/m ³]	Bの質量比率 [NC: BFA: FA: SF: EX]	EX [kg/m ³]	S	G	繊維混入率 [vol%]		
										合成繊維	鋼繊維	
										PP2	F15	DRA
STC-RDC-Base										0	0	0
STC-RDC-PP2-F15 1.0	15.0	60.3	60±10	3.5	130	0: 0.550: 0.300: 0.150: 0	20 (外割)	FNS	HG	0.33	1.0	0
STC-RDC-PP2-DRA0.5										0.33	0	0.5
STC-RDC-PP2-DRA1.0										0.33	0	1.0

膨張材 (EX) とした。BFA は JIS A 6201 に適合する高炉スラグ微粉末 4000 を使用し、FA は JIS A 6202 に適合するフライアッシュ I 種を使用した。細骨材 (S) は、フェロニッケルスラグ細骨材 (FNS) を使用した。粗骨材 (G) は最大粒径が 20mm の硬質砂岩砕石 (HG) とした。高性能減水剤 (SP1) は、JIS A 6204 に適合する主成分がポリカルボン酸系のものを使用し、消泡剤 (AF) はアルキルエーテル系のものを使用した。爆裂試験では、上記に加え、長さが 2mm のポリプロピレン繊維 (PP2)、

長さが 15mm でストレート形状の鋼繊維 (F15)、長さが 30mm でフック形状の鋼繊維 (DRA) を使用した。練混ぜは、公称容量 100L の強制二軸ミキサを使用した。練り混ぜ量は 80L/バッチとした。

3. 爆裂試験概要

(1) 爆裂試験と供試体

爆裂試験は JCI-S-014-2018 を参考に、既報⁵⁾と同様の手順で行った。爆裂試験時の供試体設置状況と供試体の模式図、写真を図-1 に示す。耐火炉は水平耐火試験炉を使用し、熱源は都市ガスとした。加熱温度は、JIS A 1304 に規定される標準加熱曲線 A に沿うように制御し、加熱時間は 30 分とした。加熱終了後は供試体の温度が雰囲気温度になるまで自然放冷を行った。なお、試験は一面加熱で行った。供試体は既報⁵⁾と同様に、100×100×400mm の角柱体とし、かぶり厚さは 40mm、中心に異形棒鋼 (D19) を設置した。D19 の両端に厚さ 6mm の拘束板を溶接した拘束治具を配置した。また、爆裂試験時に拘束板が直接加熱されることを防ぐために、端面から 50mm の範囲を耐火性断熱材により被覆した。

(2) 養生条件と試験材齢

爆裂試験に供するまでの養生条件は、条件 A、条件 B の 2 水準とする。条件 A は供試体作製後、20°C 封かんとした。条件 B は供試体作製後 20°C 封かんとし、注水から 48 時間後に 40°C 封かんとした。条件 A、B とともに材齢 28 日で脱型し、20°C、60%RH 条件で試験材齢まで気中養生とした。爆裂試験は条件 A で材齢 91、364 日、条件 B で材齢 92、365 日とした。

(3) 爆裂試験後の評価方法

爆裂試験後の評価は JCI-S-014-2018 を参考に、最大爆裂深さ、平均爆裂深さ、爆裂面積率の 3 つの項目とした。

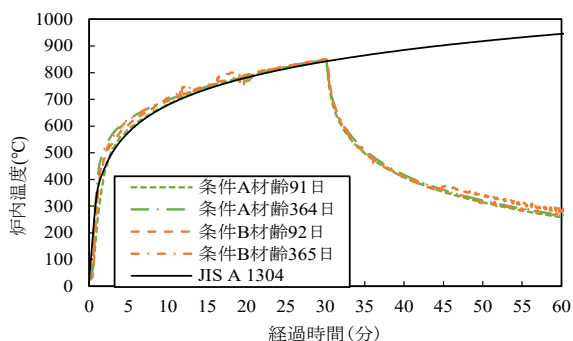


図-2 炉内温度測定結果

表-3 爆裂試験時の圧縮強度と含水率

記号	爆裂試験時の物性値							
	養生条件							
	条件A (28d20°C封かん →20°C60%RH気中)				条件B (48h20°C封かん →28dまで40°C封かん →20°C60%RH気中)			
	試験材齢[日]							
	91	364	91	364	92	365	92	365
	圧縮強度 [N/mm ²]		含水率 [wt%]		圧縮強度 [N/mm ²]		含水率 [wt%]	
STC-RDC-Base	106	133	2.47	2.83	117	126	2.53	2.95
STC-RDC-PP2-F151.0	90.9	111	2.10	2.17	125	131	2.30	2.54
STC-RDC-PP2-DRA0.5	90.7	126	2.18	2.48	116	131	2.48	2.73
STC-RDC-PP2-DRA1.0	101	126	2.21	2.57	120	125	2.26	2.71

上段：条件A (28d20°C封かん→20°C60%RH気中，材齢364日)供試体，
 下段：条件B (48h20°C封かん→28dまで40°C封かん→20°C60%RH気中，材齢365日)供試体

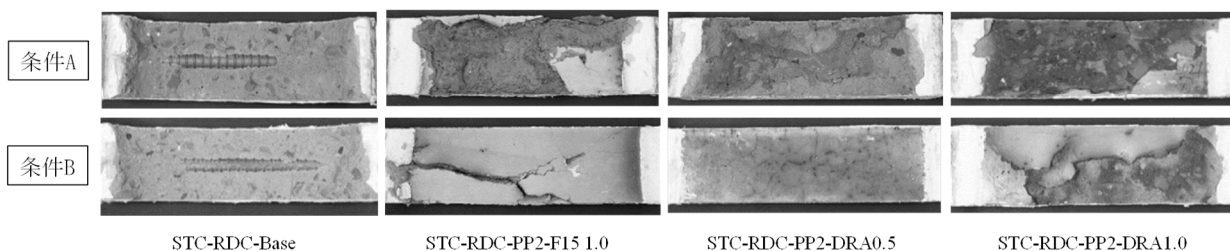


写真-1 爆裂試験後の供試体状況



写真-2 爆裂試験後の供試体

爆裂したコンクリートを鋼繊維が拘束している状況

爆裂深さは加熱面を10×20mmのメッシュで分割した交点を測定箇所(計176点)とし、レーザー変位計を用いて測定した。また、爆裂面積率は、測定した爆裂深さが0より大きい測定点数を全測定箇所(176点)で除した値とした。含水率はJIS A 1476に準拠し、爆裂試験の供試体と同一養生を行ったφ100×200mmの円柱供試体を用いて測定した。

4. 爆裂試験結果

炉内温度の測定結果を図-2に示す。図中にはJIS A

1304に示される標準加熱曲線Aも併せて示す。各試験における炉内温度は均一であり、標準加熱曲線に沿って制御されていた。爆裂試験時の圧縮強度と含水率を表-3に示す。材齢91、92日から材齢364、365日にかけての強度増進は、条件Aのほうが条件Bよりも大きくなった。また試験時の含水率は、条件Aは材齢91日で2.10~2.47wt%，材齢364日で2.17~2.83wt%，条件Bは材齢92日で2.26~2.53%，材齢365日で2.54~2.95wt%であり、全て含水率3.00wt%以下であった。

爆裂試験後の供試体の一例を写真-1、2に示す。試験後の供試体を観察した結果、鉄筋が露出していたのは繊維を混入していないSTC-RDC-Baseのみであった。また、繊維を混入した供試体において、写真-2に示すようにかぶり部分において、爆裂したコンクリートが鋼繊維に拘束され、飛散せずに留まっている状況が確認された。繊維混入による爆裂抑制効果については、有機繊維による水蒸気圧や熱応力の緩和効果と鋼繊維による補強効果があると指摘されている⁶⁾。今回対象としたコンクリートについても、鋼繊維による補強効果で爆裂が抑制される結果が得られた。

次に、最大爆裂深さ、平均爆裂深さ、爆裂面積率の測定結果を図-3に示す。なお、各測定結果には、鋼繊維の補強効果により剥落していない表層部分のコンクリ

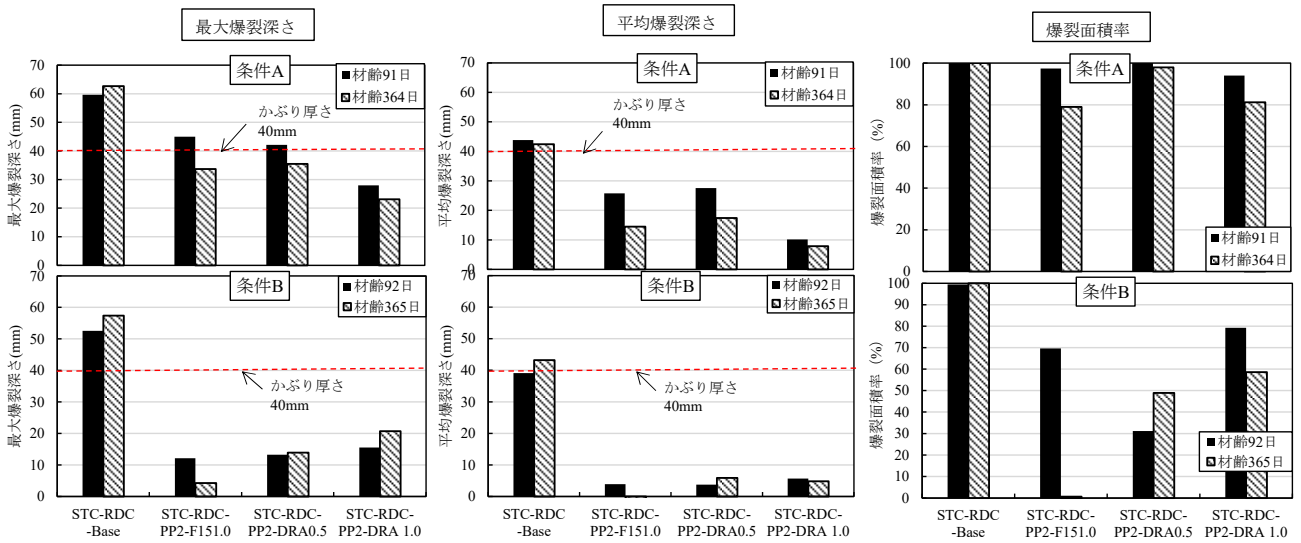


図-3 最大爆裂深さ，平均爆裂深さ，爆裂面積率の測定結果

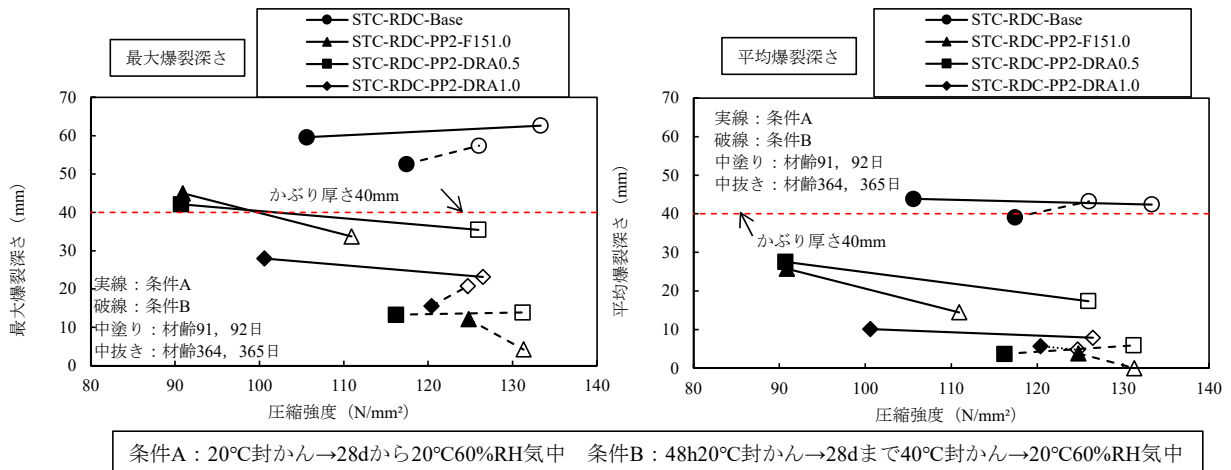


図-4 圧縮強度と最大爆裂深さ，平均爆裂深さの関係

ートも測定値に含まれている。図-3 の条件 A に着目すると、繊維を混入した供試体は、材齢の経過とともに爆裂面積率、平均爆裂深さ、最大爆裂深さが小さくなる傾向が確認された。また、鋼繊維の種類と最大爆裂深さに着目すると、鋼繊維の混入率が 1.0vol% の条件で、ストレート形状の F15 よりもフック形状の DRA を混入したものの最大爆裂深さが小さくなった。一方、条件 B では、条件 A で見られたような材齢の経過や繊維の種類による明確な傾向は確認できなかったが、繊維を入れた水準では全てかぶり厚さを下回る結果となった。

図-4 に圧縮強度と、最大爆裂深さ、平均爆裂深さの関係を示す。条件 A の平均爆裂深さに着目すると、繊維を混入した水準において加熱時の強度が高いほど平均爆裂深さは小さくなる傾向が確認できた。また、繊維を混入した全ての水準で平均爆裂深さは、かぶり厚さに到達しない結果となっており、繊維混入による爆裂抑制効果が確認できた。繊維を混入した水準における最大爆裂深

さも、平均爆裂深さと同様に加熱時の強度が高いほど小さくなるが、圧縮強度 90N/mm² 付近ではかぶり厚さを上回った。他方、圧縮強度の高い条件 B の場合には、繊維を入れた水準では最大爆裂深さと平均爆裂深さがともに条件 A より小さくなっている。今回の実験結果では、鋼繊維混入率が 1.0vol% の水準において、圧縮強度 116N/mm² 以上で最大爆裂深さが 30mm を下回る結果となった。

本実験から、STC-RDC による RC 部材の火災時におけるかぶり部分の保護には、鋼繊維を 1.0vol% 混入することが有効であり、圧縮強度が一定程度発現していることが重要と考えられる。

5. まとめ

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調合 (STC-RDC) の強度増進に伴う爆

裂性状の変化を実験で確認した。本実験の範囲内で以下のことが分かった。

- ① 鋼繊維を混入することで、爆裂したコンクリートの飛散を抑制する効果が得られる。
- ② 鋼繊維の形状に着目すると、フック形状の鋼繊維を1.0vol%混入することで爆裂による損傷の低減効果が高まった。
- ③ ポリプロピレン繊維と鋼繊維を混入した STC-RDC は、圧縮強度の増進に伴い、爆裂による損傷が小さくなった。

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 野口貴文教授に助言いただきました。ここに記して感謝いたします。

参考文献

- 1) 一般社団法人セメント協会：セメントの LCI データの概要，2022. 3
- 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) 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
- 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 4：実験シリーズII 室内試験における中性化抵抗性と爆裂試験結果，日本建築学会大会学術講演梗概集（北海道），pp.665-666, 2022.9
- 5) 峯竜一郎ほか：繊維長さの短いポリプロピレン繊維と鋼繊維の混入率が超高強度コンクリートの爆裂抑制に与える影響に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.41, No.1, pp.1199-1204, 2019
- 6) 三井健郎ほか：超高強度コンクリート柱の耐火性能向上に関する研究，竹中技術研究報告，No.66, 2010