

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—

Examination on Practical Application of Ultra-low Shrinkage and High Strength Concrete without Portland Cement

—Part2 Carbonation Resistance and Spalling Properties—

R&Dセンター 小宮 克仁 KATSUHIKO 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

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、中性化抵抗性と爆裂性状を室内試験で確認した。実験の結果、中性化の進行は従来のセメントコンクリートと同様であり、既往の中性化速度式を用いて評価可能であることが示唆された。爆裂性状は、一般的な高強度コンクリートと同様に、所定量のポリプロピレン繊維と鋼繊維を混入することで抑制できた。また、圧縮強度が高く、含水率の低い条件で爆裂による損傷が小さくなった。

キーワード：ポルトランドセメント不使用，低環境負荷，高強度コンクリート，中性化，爆裂，鋼繊維，
ポリプロピレン繊維

In this study, practical application of ultra-low shrinkage and high-strength concrete that does not use portland cement, carbonation resistance and spalling properties were confirmed by laboratory tests. As a result of the experiment, it was suggested that the progress of carbonation is similar to that of conventional cement concrete and can be evaluated using the carbonation rate equation. The spalling properties were able to suppress by mixing a predetermined amount of polypropylene fiber and steel fiber as in the case of conventional high-strength concrete. In addition, the damage caused by the spalling was reduced under the conditions of high compressive strength and low water content.

Key Words: No-portland cement, Low environmental impact, High strength concrete, Carbonation, Spalling, 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。そのなかでもコンクリート分野においては、一般的なコンクリートの材料であるセメントが、製造時に大量の二酸化炭素（セメント1トン当たり二酸化炭素758kg）を発生させることが知られている¹⁾。

そのような背景の中、筆者らはポルトランドセメン

ト（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具体的な調合（STC-RDC）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、この調合条件における中性化抵抗性と爆裂性状に着目した検討を行った。

中性化はコンクリートの耐久性の観点から重要な現象の一つであり、STC-RDCの実構造物への適用を検討

表-1 使用材料

種類	記号	種類	物性等	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%	STC-RDC	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
	FA	フライアッシュ	密度: 2.40g/cm ³ , 比表面積: 5,680cm ² /g		F15	鋼繊維	密度: 7.85 g/cm ³ , 繊維長さ: 15mm, 繊維径: 0.2mm
	SF	シリカフェーム	密度: 2.26g/cm ³ , 比表面積 (BET法): 200,000cm ² /g		DRA	鋼繊維	密度: 7.85 g/cm ³ , 繊維長さ: 30mm, 繊維径: 0.62mm
	EX	膨張材	密度: 3.17g/cm ³ , 比表面積: 5,000cm ² /g	H-CON	NC	普通ポルトランドセメント	密度: 3.16g/cm ³ , 比表面積: 3,240cm 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		S1	陸砂	表乾密度: 2.60g/cm ³ , 粗粒率: 2.16 茨城県潮来市島須産
	HG	硬質砂岩砕石2005	表乾密度: 2.63g/cm ³ , 実積率: 59.0% 栃木県鹿沼産		S2	硅岩砕砂	表乾密度: 2.63g/cm ³ , 粗粒率: 3.07 栃木県佐野市関馬町産
	W	上水道水	密度: 1.00g/cm ³		LG	石灰砕石2005	表乾密度: 2.74g/cm ³ , 実積率: 60.0% 栃木県栃木市錦山町産
	SP1	高性能減水剤	ポリカルボン酸系		W	上水道水	密度: 1.00g/cm ³
	AF	消泡剤	アルキルエーテル系		SP2	高性能AE減水剤遅延形	ポリカルボン酸エーテル系

表-2 コンクリートの調合条件

試験名	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
実験シリーズ I 中性化	STC-RDC	15.0	60.4	60±10	3.5	130	0 : 0.537 : 0.293 : 0.147 : 0.023	20	FNS	HG	-	-	-
	H-CON	28.6	45.0								3.0	170	1 : 0 : 0 : 0 : 0
実験シリーズ II 耐火性能	STC-RDC-Base	15.0	60.3	60±10	3.5	130	0 : 0.550 : 0.300 : 0.150 : 0	20 ^{*1}	FNS	HG	0	0	0
	STC-RDC-PP2-F15 1.0										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

*1 外割, *2 S1:S2=50:50(質量比)

するにあたっては、STC-RDC の中性化についての特性を把握しておくことが必要である。

爆裂は、特に高強度コンクリートにおいて、火災等に起因する加熱により表層部分のコンクリートが剥離、飛散する現象である。これは、組織が緻密になり圧縮強度が高くなるほど生じやすい、また、コンクリート中の含水率の影響も大きく、含水率が高いほど爆裂が生じやすいといわれている^{4),5)}。高強度コンクリートの爆裂抑制の方法としては、コンクリート中に合成繊維と鋼繊維を混入する技術が広く知られている⁶⁾。しかし、ポルトランドセメントを使用しない条件で硬化した水和生成物に対する爆裂性状とその抑制に関する知見は少なく、STC-RDCにおける爆裂性状の検討は重要である。

以上の背景から本研究では、STC-RDC に関して、中性化抵抗性に関しては促進中性化試験を行い、材齢 28 日の圧縮強度と同程度の一般的な高強度コンクリート (H-CON) との中性化深さを比較した。爆裂性状に関しては、合成繊維と鋼繊維の種類と混入率を水準とし、

爆裂試験を行った。

2. 試験条件

コンクリートの使用材料を表-1 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)、膨張材 (EX) とした。BFA は JISA6201 に適合する高炉スラグ微粉末 4000 を使用し、FA は JISA6202 に適合するフライアッシュ I 種を使用した。細骨材は、フェロニッケルスラグ細骨材 (FNS) を使用した。粗骨材は最大粒径が 20mm の硬質砂岩砕石 (HG) とした。高性能減水剤 (SP1) は、JISA6204 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、繊維長さが 2mm のポリプロピレン繊維 (PP2)、繊維長さが 15mm、ストレート形状の鋼繊維 (F15)、繊維長さが 30mm、フック形状の鋼繊維 (DRA) を使用した。

表-3 フレッシュ試験結果

試験名	試験体名	SP [B×%]	AF [B× 0.001%]	スランブフロー[cm]	時間 [sec]		空気量 [%]	練上り温度 [°C]	雰囲気温度 [°C]
					50cm到達	流動停止			
実験シリーズ I 中性化	STC-RDC	0.90	9.0	59.0	12.0	79	3.7	24.9	19.8
	H-CON	1.90	-	63.5	3.7	4.9	1.8	30.3	23.9
実験シリーズ II 耐火性能	STC-RDC-Base	0.90	7.0	57.5	13.1	69.1	3.9	23.9	19.8
	STC-RDC-PP2-F15 1.0	1.00	9.0	43.5	-	91.5	3.9	23.3	19.6
	STC-RDC-PP2-DRA0.5	1.10	9.0	63.7	15.9	213	4.2	23.9	20.0
	STC-RDC-PP2-DRA1.0	1.10	13.0	54.3	25.8	94.1	3.6	24.2	19.9

H-CON は結合材を普通ポルトランドセメント (NC) とし、細骨材は陸砂 (S1) と硅岩砕砂 (S2)、粗骨材は石灰碎石 (LG) とした。高性能 AE 減水剤 (SP2) は JISA6204 に適合するポリカルボン酸系のものを使用した。コンクリートの調合条件を表-2 に示す。STC-RDC は水結合材比 (W/B) を 15.0%, 単位水量を 130kg/m³ とした。また、実験シリーズ I (中性化) では、膨張材は結合材中に含めた。実験シリーズ II (爆裂性状) では、膨張材、合成繊維、鋼繊維は体積外割りで混入した。このため、実験シリーズ I の W/B は膨張材込みの条件、実験シリーズ II における W/B は膨張材を含めない条件で W/B15.0%としている。練混ぜは、公称容量 100L の強制二軸ミキサを使用して、図-1 に示す手順で行った。

H-CON は市中の生コン工場で製造したレディーミクスコンクリートとした。材齢 28 日における圧縮強度が STC-RDC と同程度になるよう呼び強度 71 の配合を選定した。W/B は 28.6%, 単位水量は 170kg/m³ である。

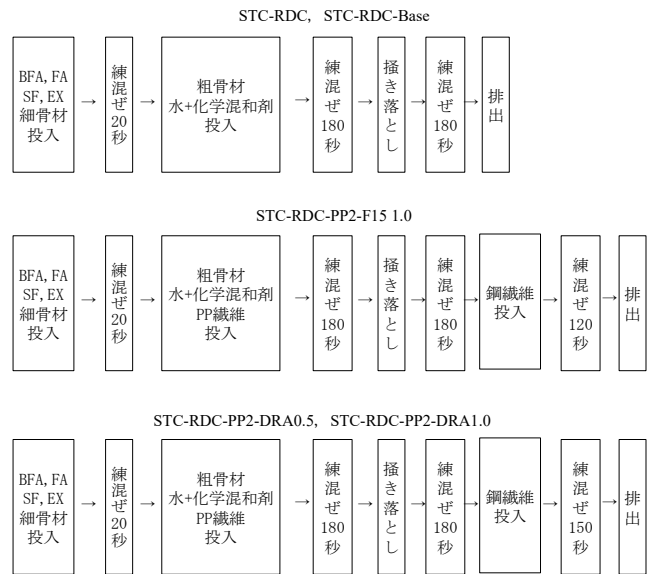


図-1 STC-RDC の練り混ぜ手順

ここで、X:中性化深さ(mm), A:促進中性化速度係数 (mm/√週), t:時間(週)とした。

3. 試験概要

(1) フレッシュ試験

フレッシュ試験はスランブフロー (JISA1150 に準拠), 空気量試験 (JISA1128 に準拠), 温度測定 (JISA1156 に準拠) を行った。

(2) 促進中性化試験

中性化抵抗性は、JIS A 1153 に準拠した促進中性化試験により確認した。試験体は 100×100×400mm の角柱体とした。材齢 4 週まで標準水中養生、8 週まで 20°C, 60%RH 環境下で気中養生を行い、7-8 週の間促進面以外をアルミテープで気泡の無いように覆った。その後、20°C, 60%RH, CO₂ 濃度 5%環境下に静置し、促進期間 29, 58, 93, 188 日に中性化深さの測定を行った。また、促進中性化速度係数の算出には次に示す式(1)、いわゆる√t則を用いた。

$$X = A\sqrt{t} \quad (1)$$

(3) 爆裂性状

a) 爆裂試験

爆裂試験は JCI-S-014-2018 を参考に、既往の文献⁷⁾と同様の手順で行った。耐火炉は水平耐火試験炉 (炉内寸法: 幅×奥行×高さ=4000×4000×3500mm) を使用した。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た。既往の研究によると、コンクリートの爆裂は加熱 30 分以内に大方終了するケースが多いことが確認されている⁴⁾。このため、本実験においても加熱時間は加熱初期に発生する爆裂現象を確認するため、30 分とした。加熱終了後は試験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。

b) 試験体

試験体は文献⁶⁾と同様に、100×100×400mm の角柱体とし、中心に異形棒鋼 (D19) を設置した。D19 の両端

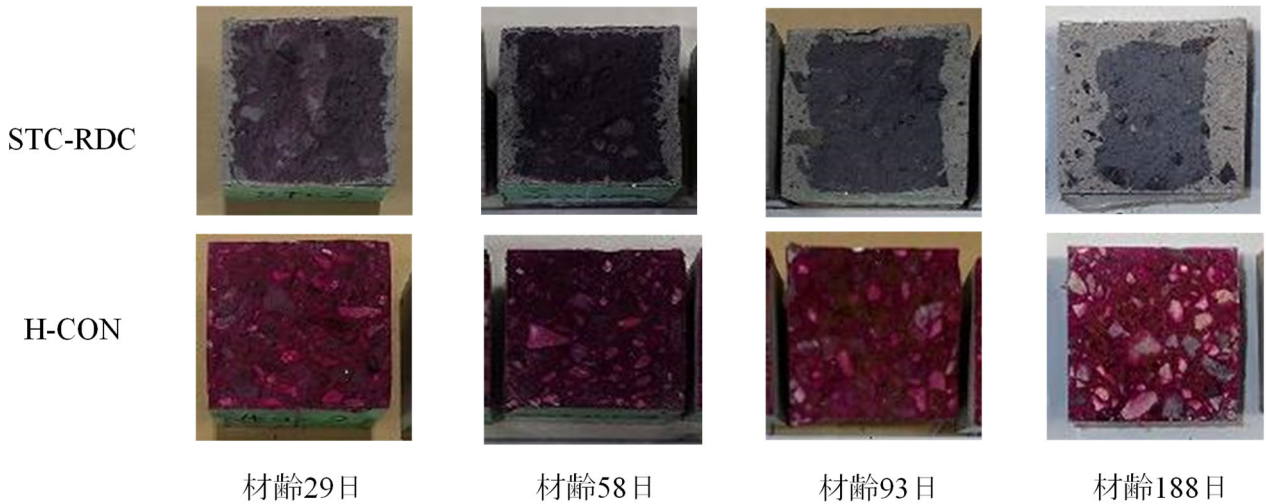


写真-1 促進中性化試験後のフェノールフタレイン溶液を噴霧した試験体の色の違い

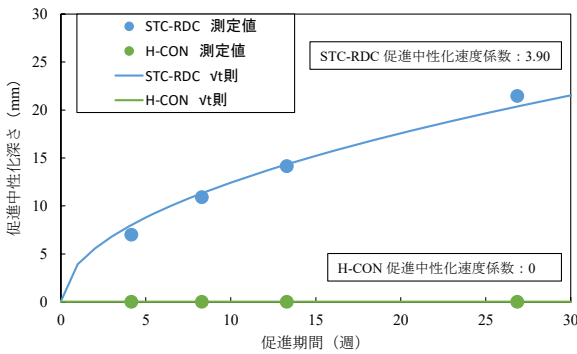


図-2 促進期間と促進中性化深さとの関係

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 の範囲を耐火ブランケットにより被覆した。

c) 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℃封かんとした。条件 B は、供試体作製後 20℃封かんとし、注水から 48 時間後に 40℃封かんとした。条件 A、B ともに材齢 28 日で脱型し、20℃、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 日、条件 B で材齢 92 日とした。

d) 爆裂試験後の評価

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。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)とした。測定にはレーザー変位計を用いて深さ方向の測定を行った。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)で除した値を爆裂面積率とした。含水率は JIS A 1476 に準拠し、爆裂試験の試験体と同一養生を行ったφ100×200mm の円柱供試体を用いて計測した。

4. フレッシュ試験結果

表-3 にフレッシュ試験結果を示す。STC-RDC のスランプフローに着目すると、STC-RDC-PP2.0-F151.0 のスランプフロー値が 43.5cm と目標値の範囲外となったが、その他の水準は目標値の範囲内となった。空気量は全ての水準で目標値の範囲内となった。また、H-CON のスランプフローと空気量は目標値の範囲内であった。

5. 促進中性化試験結果

促進中性化試験の結果を図-2 に示す。図中には測定結果を式(1)に最小二乗法で近似した曲線を併記した。STC-RDC の結果を見ると、促進期間の経過とともに中性化深さが大きくなった。また、促進期間の平方根との比例関係が確認され、従来のコンクリートと同様に√t則を用いた評価ができると考えられる。H-CON の結果を見ると、促進期間 26 週においても中性化深さは 0cm であり、指針⁸⁾などで示されている通りの結果となった。√t則より得られた促進中性化速度係数は、STC-RDC、H-CON でそれぞれ 3.93、0 となった。なお、ここで比較している 2 水準の材齢 28 日の圧縮強度は、STC-RDC が 73N/mm²、H-CON が 84N/mm²であった。

また、フェノールフタレイン 1%溶液を噴霧した際の割裂面の状況を写真-1 に示す。H-CON と比べ STC-RDC のフェノールフタレイン溶液による呈色反応の色が薄いことから pH 値が低いことがわかる⁹⁾。pH 値が低いこと

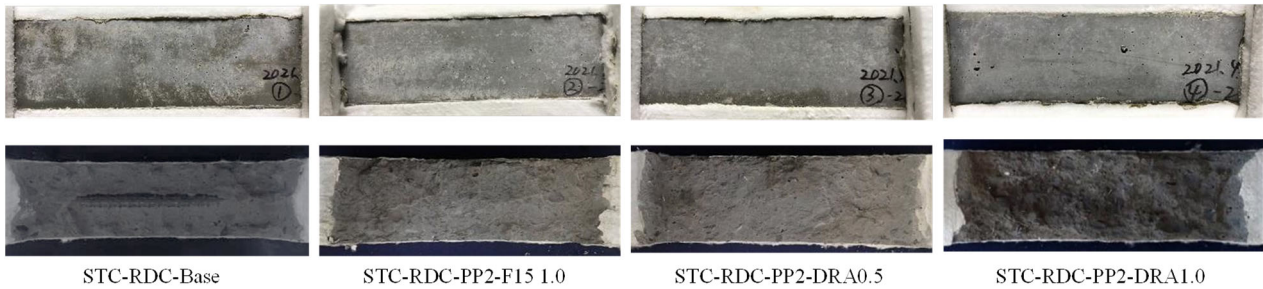


写真-2 条件 A (28d20°C封かん→20°C60%RH 気中) 供試体
 爆裂試験後の試験体状況 (上段: 爆裂試験前, 下段: 爆裂試験後)

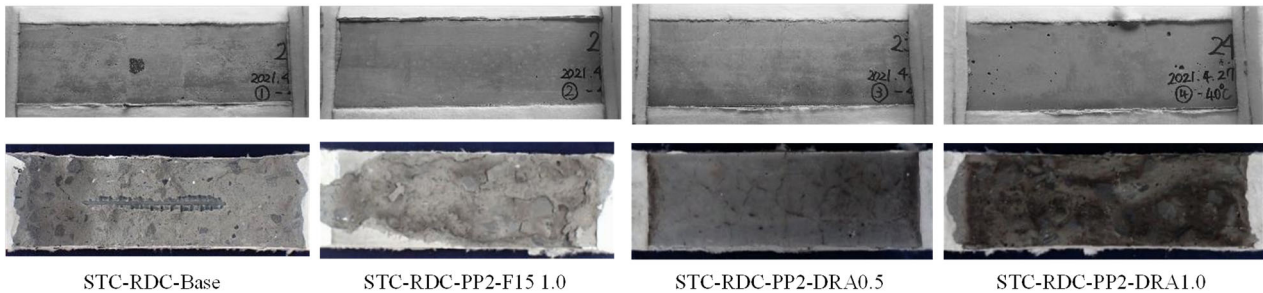


写真-3 条件 B (48h20°C封かん→28dまで40°C封かん→20°C60%RH 気中) 供試体
 爆裂試験後の試験体状況 (上段: 爆裂試験前, 下段: 爆裂試験後)

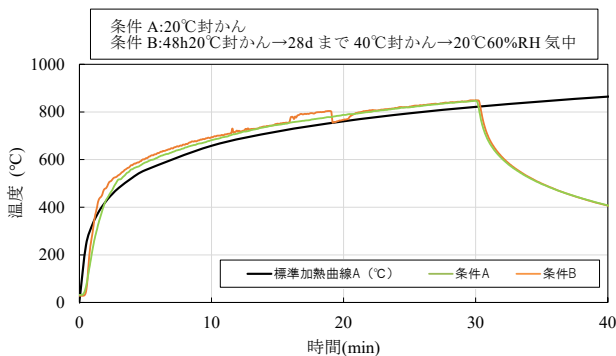


図-3 炉内温度測定結果

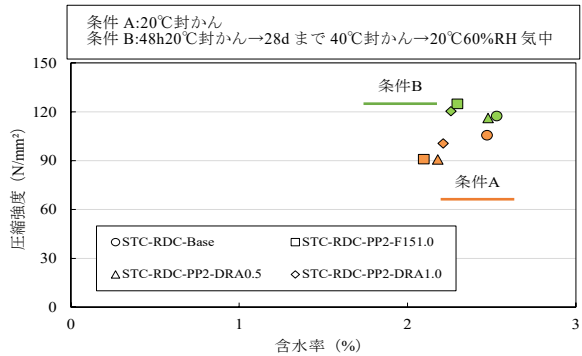


図-4 含水率と圧縮強度との関係

が鉄筋の保護性能に与える影響については、STC-RDCの組織の緻密性も考慮し評価する必要があり、今後の研究課題としたい。なお、STC-RDCの中性化深さは、色の変化している箇所を中性化部と未中性化部の境界であるとみなして測定を行った。

6. 爆裂試験結果

爆裂試験時の炉内温度の測定結果を図-3に示す。図中には標準加熱曲線Aを併記した。炉内温度は標準加熱曲線Aとおおむね一致していた。圧縮強度と含水率との関係を図-4に示す。条件Bは条件Aと比較し、圧縮強度は高く、含水率は同等もしくは多少大きい結果が得られた。また、条件Aの含水率は2.1-2.5%、圧縮強度は90-106N/mm²、条件Bの含水率は2.3-2.5%、圧縮強度は

116-125N/mm²の範囲にあり、Baseの含水率が最も大きい傾向を示した一方、繊維の種類や混入率の違いが圧縮強度と含水率に与える影響は小さかった。

また、火災中に爆裂により鉄筋が露出すると、鉄筋の温度が著しく上昇することで降伏点が低下し、構造耐力上危険になることが考えられる。このため、本検討では鉄筋の露出の有無にも着目した。爆裂試験後の試験体を写真-2, 3に示す。STC-RDC-Baseは、養生条件によらず爆裂が発生し、鉄筋が露出していた。一方、繊維を混入した水準は、爆裂は生じているが、鉄筋が露出しているものはなかった。一般的に、含水率が3-4%以下の場合、爆裂が生じにくくなるが、W/B=35.0%以下の範囲では含水率4%以下でも爆裂が生じるとされており¹⁰⁾、本試験の水準においても爆裂が生じる結果となった。

PP繊維混入率と最大爆裂深さ、平均爆裂深さ、爆裂

面積率の関係を図-5 に示す。条件 A と比較し、条件 B では最大爆裂深さ、爆裂面積率のどちらも小さい値を示す傾向となった。今回の試験体はかぶり厚さが 40mm であり、条件 A においては STC-RDC-PP2.0-DRA1.0 以外、条件 B は STC-RDC-Base のみ最大爆裂深さがかぶり厚さを上回り、鉄筋が露出する結果となった。今回の試験結果においては、圧縮強度が高いほうが爆裂による損傷が小さくなる傾向が見られた。圧縮強度と爆裂の関係が一般的な高強度コンクリートとは異なる性状が得られたが、その詳しいメカニズムに関しては今後の課題とする。なお、平均爆裂深さに関しては最大爆裂深さと同様の傾向を示した。

本試験の結果、STC-RDC は従来の高強度コンクリートと同様¹⁾に繊維を混入することで、鉄筋が露出しない程度まで爆裂を抑制できることが分かった。

7. 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) の中性化抵抗性と爆裂性状を実験で確認し、本実験の範囲内で以下のことが分かった。

- ① STC-RDC はセメントを使用したコンクリートと同様に中性化が進行し、その中性化深さは \sqrt{t} 則を用いた評価が可能だと考えられる。
- ② STC-RDC の爆裂は、従来の高強度コンクリートと同様に繊維を混入することで抑制できた。
- ③ STC-RDC の爆裂による損傷は、圧縮強度が高い方が小さくなった。

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) 森田武：コンクリートの爆裂とその防止対策, コンクリート工学, Vol.45, No.9, pp87-91, 2007.
- 5) 日本建築学会：構造材料の耐火性ガイドブック,

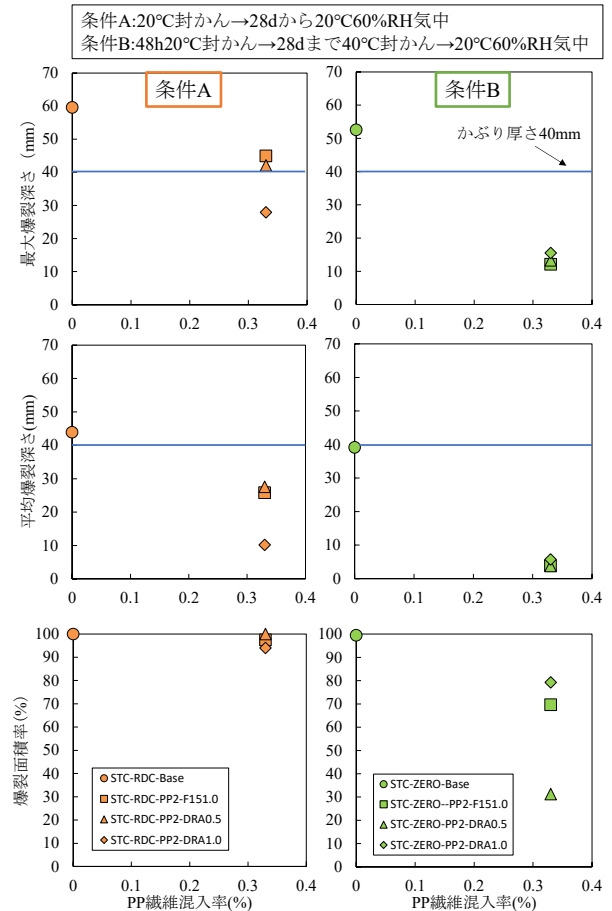


図-5 PP 繊維混入率と最大爆裂深さ、平均爆裂深さ、爆裂面積率との関係

pp.98-109, 2009.

- 6) 三井健郎ほか：ハイブリッド型繊維補強を用いた設計基準強度 150~200N/mm² 超高強度・高性能コンクリートの強度発現、じん性と耐火性能に関する研究, 材料, Vol.60, No.8, pp.701-708, 2011. 8
- 7) 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.
- 8) 鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計施工指針・同解説, 日本建築学会, 2016.
- 9) 平松茂樹ほか：「化学」の授業で色の変化を見る — 酸塩基指示薬を中心に —, 化学と教育, Vol.65, No.8, pp.396-399, 2017.
- 10) 日本コンクリート工学会：高温環境下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, pp.60-72, 2017. 9
- 11) 森田武ほか：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, No.544, pp.171-178, 2001.