

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—

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

—Part1 Mechanical Characteristics and Shrinkage Properties —

R&Dセンター 坂本 遼 RYO SAKAMOTO
R&Dセンター 峯 竜一郎 RYUICHIRO MINE
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プレキャストコンクリート部材としての実用化に向け、室内試験によりフレッシュ性状、力学特性および収縮性状を確認した。その結果、1) 安定したフレッシュ性状が得られること、2) ポルトランドセメントを使用した一般的な高強度コンクリートに比べ圧縮強度は長期にわたり増進し、静弾性係数は高いこと、3) 割裂引張強度と曲げ強度はポルトランドセメントを使用した一般的な高強度コンクリートと同様に圧縮強度を指標とした推定が可能であること、4) 自己収縮ひずみおよび乾燥収縮ひずみは非常に小さいことが確認された。

キーワード：ポルトランドセメント不使用、低環境負荷、フレッシュ性状、力学特性、超低収縮

For practical use of ultra-low shrinkage and high strength concrete without portland cement as a precast concrete member, fresh properties, mechanical characteristics, and shrinkage properties were confirmed by laboratory tests. As a result, the followings were confirmed; 1) The fluctuation of fresh properties was small, 2) Compared to high-strength concrete, the long-term increase in compressive strength was large, and static elasticity was high, 3) The split tensile strength and bending strength can be estimated using the compressive strength as an index, as in the case of conventional high-strength concrete, 4) The self-shrinkage strain and the dry shrinkage strain were very small.

Key Words: Non-portland cement, Low environmental impact, Fresh properties, Mechanical characteristics, Ultra-low shrinkage

1. はじめに

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））が開発されている^{1),2)}。STCの調合条件は、収縮・クリープの原因となる自由水量を減らすことを目的に単位水量を極力低減しかつ低水結合材比とする点に特徴がある。この水結合材比の低下により懸念される自己収縮の増大についてはフェロニッ

ケルスラグ細骨材（FNS）等の自己収縮低減効果の高い細骨材を採用することで解決しているコンクリートである³⁾。

本報では、STCのうちセメントを使用しない調合（STC-RDC）を対象として、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フレッシュ性状、力学特性、クリープ性状および収縮性状を室内試験で確認した。また、圧縮強度が同程度のセメントを使用した一般的な高強度コンクリート（H-CON）にて比較検討を行った。

表-1 コンクリートの調合条件

名称	W/B [%]	s/a [%]	目標スランブフロー [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
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	0	S1+S2 ^{※1}	LG

※1 S1:S2=50:50 (質量比)

表-2 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
	FA	フライアッシュ	密度 : 2.40g/cm ³ , 比表面積 : 5,680cm ² /g
	SF	シリカフェューム	密度 : 2.26g/cm ³ , 比表面積 : 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
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
	S1	陸砂	表乾密度 : 2.60g/cm ³ , 粗粒率 : 2.16
	S2	硅岩砕砂	表乾密度 : 2.63g/cm ³ , 粗粒率 : 3.07
	LG	石灰砕石2005	表乾密度 : 2.74g/cm ³ , 実積率 : 60.0%
	W	上水道水	密度 : 1.00g/cm ³
	SP2	高性能AE減水剤遅延形 1 種	ポリカルボン酸エーテル系

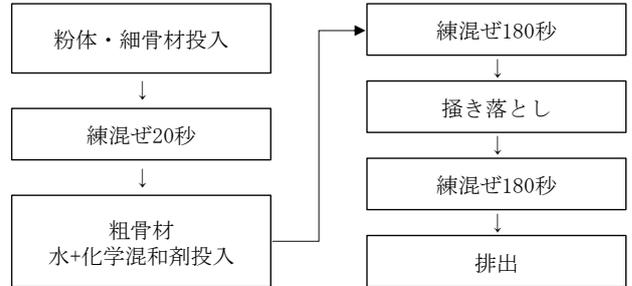


図-1 練混ぜ手順

表-3 試験項目・試験方法

試験項目	試験方法	目標値	STC-RDC	H-CON
スランブフロー	JIS A 1150	60±10cm	○	○
空気量試験	JIS A 1128	3.5±1.5% ^{※2}	○	○
温度測定	JIS A 1156	—	○	○
圧縮強度	JIS A 1108	—	○	○
割裂引張強度	JIS A 1113	—	○	○
曲げ強度	JIS A 1106	—	○	○
ヤング係数	JIS A 1149	—	○	○
圧縮クリープ	JIS A 1157	—	○	—
長さ変化率	JIS A 1129	—	○	○
乾燥収縮ひずみ	参考文献 ⁽⁴⁾	—	○	○
自己収縮ひずみ	参考文献 ⁽⁴⁾	—	○	○

※2 H-CONは3.0±1.0%

2. 試験概要

コンクリートの調合条件を表-1、使用材料を表-2に示す。STC-RDCの水結合材比は15.0%、単位水量は130 kg/m³とした。結合材には、高炉スラグ微粉末、フライアッシュ、シリカフェュームおよび膨張材を使用している。STC-RDCの練混ぜは図-1に示す手順で行い、公称容量100リットル強制二軸ミキサを使用した。

H-CONは市中のレディミクストコンクリート工場から運搬した高強度コンクリートとし、水結合材比は28.6%、単位水量は170 kg/m³とした。

試験項目および試験方法を表-3に示す。力学特性は、圧縮強度、静弾性係数、割裂引張強度および曲げ強度を確認した。収縮性状は、圧縮クリープ、長さ変化率に加えて、埋込型ひずみ計を用いて乾燥収縮ひずみおよび自己収縮ひずみを確認した。

3. 試験結果

(1) フレッシュ性状

STC-RDCおよびH-CONのフレッシュコンクリート試験結果を表-4に、STC-RDCの各バッチにおけるスランブフローと空気量の測定結果を図-2、図-3にそれぞれ示す。また、写真-1、写真-2にSTC-RDCとH-CONのスランブフローの様子を示す。

STC-RDCはいずれのバッチにおいてもスランブフローと空気量の目標値を満たす結果となり、フレッシュ性状は安定していることが確認された。また、STC-RDCのスランブフローはH-CONと同等であった一方、50cmフロー到達および流動停止時間は長く、従来の超低水結合材比条件のコンクリートと同様の傾向となった。しかしながら、スコップによる切返し作業はそれらに比べて容易であった。

表-4 フレッシュコンクリート試験結果

コンクリート種類	バッチNo.	SP [B×%]	AF [B×0.001%]	スランプフロー [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				
STC-RDC	1	0.90	9.0	59.5 × 57.6	58.5	13.3	82.0	3.8	25.5	20.1
	2	0.90	9.0	57.5 × 57.4	57.5	15.0	83.6	3.7	24.5	19.9
	3	0.90	9.0	54.8 × 54.0	54.5	18.0	71.3	3.8	25.2	20.4
	4	0.90	9.0	53.2 × 51.6	52.5	27.0	58.3	4.0	24.8	19.2
	5	0.90	9.0	59.5 × 58.7	59.0	12.0	78.5	3.7	24.9	19.8
H-CON	-	1.90	-	65.0 × 61.6	63.5	3.7	4.9	1.8	30.3	23.9

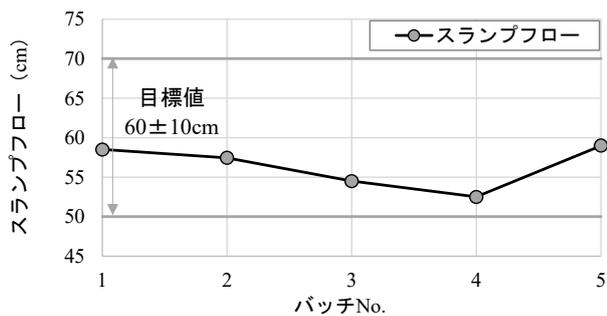


図-2 STC-RDC スランプフロー

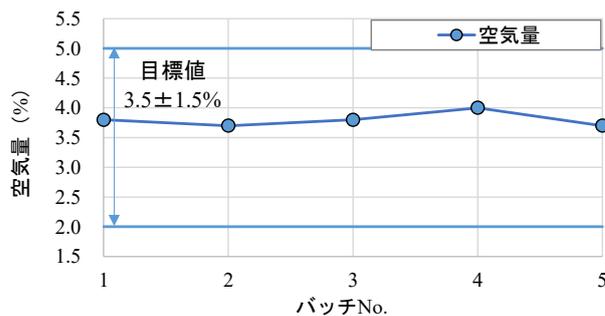


図-3 STC-RDC 空気量



写真-1 STC-RDC スランプフローの様子



写真-2 H-CON スランプフローの様子

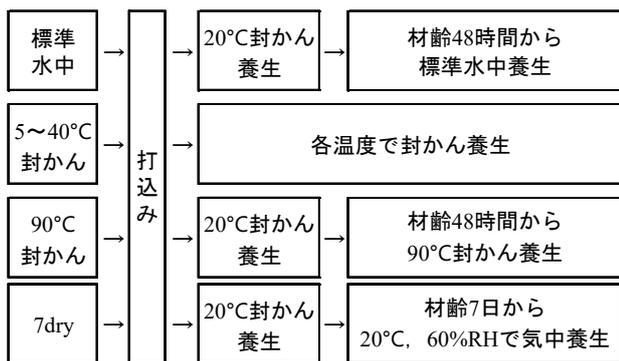


図-4 円柱供試体の養生方法

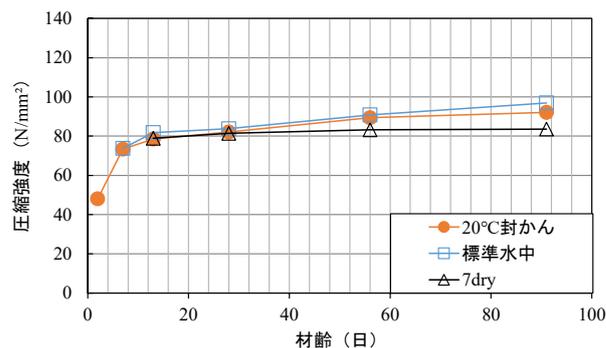


図-5 H-CON 圧縮強度試験結果

(2) 圧縮強度

円柱供試体の養生は図-4 に示す方法で行った。H-CON の圧縮強度試験を図-5 に、STC-RDC の圧縮強度試験結果を図-6 と図-7 に示す。

標準水中 28日と 91日の圧縮強度は、STC-RDCが 72.7 N/mm² と 104 N/mm², H-CON が 83.8 N/mm² と 96.9

N/mm²となり、STC-RDCはH-CONに比べて長期的な圧縮強度の増進が大きいことが分かった。

STC-RDC 供試体の圧縮強度試験後の様子を写真-3 に示す。破壊後の供試体は円錐型になっており、一般的なセメントを使用した高強度コンクリートと同様であった。

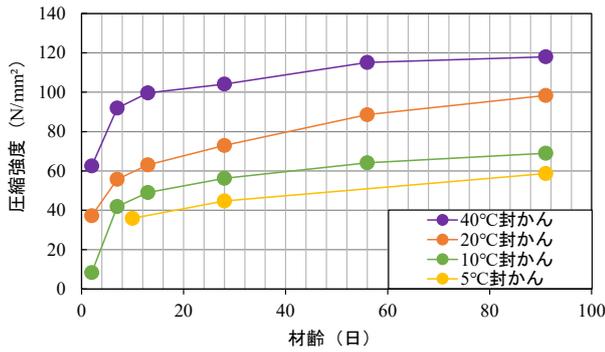


図-6 STC-RDC 圧縮強度試験結果 (封かん養生)

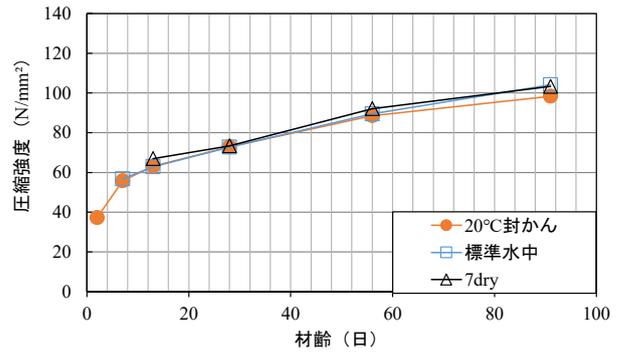


図-7 STC-RDC 圧縮強度試験結果 (温度 20°C条件)



写真-3 STC-RDC 圧縮強度試験後の供試体

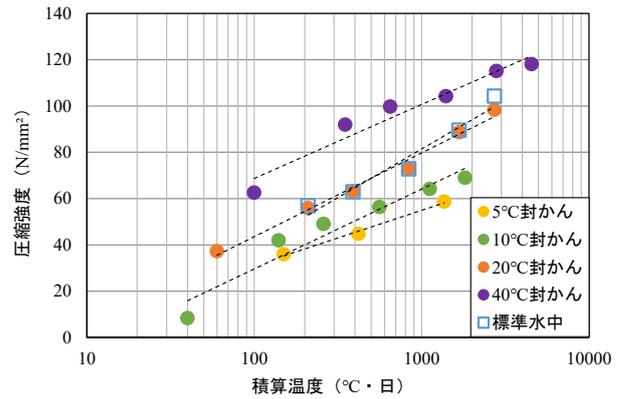


図-8 STC-RDC 積算温度と圧縮強度との関係

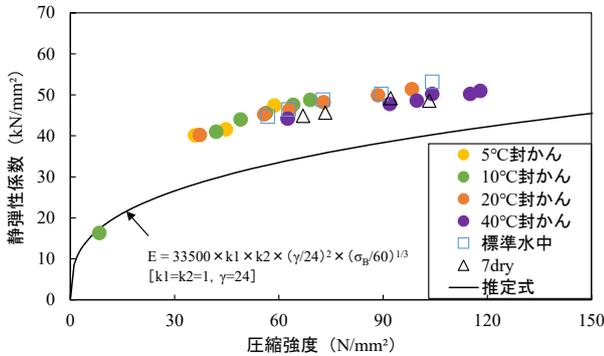


図-9 STC-RDC 圧縮強度と静弾性係数との関係

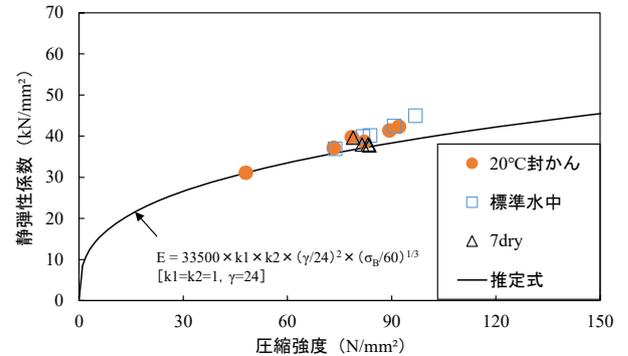


図-10 H-CON 圧縮強度と静弾性係数との関係

a) 養生温度の影響

図-6 より、5～40°C封かんの STC-RDC の圧縮強度を比較すると、従来のコンクリートと同様に、養生温度が低いと圧縮強度が低く、養生温度が高いと圧縮強度が高い結果となった。

次に、標準水中および 5～40°C封かんの STC-RDC の積算温度と圧縮強度との関係を図-8 に示す。積算温度は-10°Cを基準とする式 (1) で算出した。

$$M = \Sigma (\theta + 10) \times t \quad \dots \text{式 (1)}$$

ここに、M：積算温度 (°C · 日) T：時間 (日)

θ：養生温度 (°C)

各養生条件における積算温度と圧縮強度の相関性は

高いことが確認された。しかし、全てのデータにおける積算温度を指標とした圧縮強度の統一的な評価はできず、養生温度と強度増進の関係は今後の検討課題である。

b) 水分供給条件の影響

材齢 7 日から温度 20°C、60%RH の気中養生としたものの (図中：7dry) に着目すると、図-5 より、H-CON の圧縮強度は、標準水中と 20°C封かんしたものと比較して小さくなった。一方、図-7 より、STC-RDC にそのような傾向は見られなかった。筆者らは既往の研究⁵⁾にて、水分供給の条件によらず、圧縮強度が一様に増加する特徴的な性質を確認しており、STC-RDC も同様の傾向が確認された。

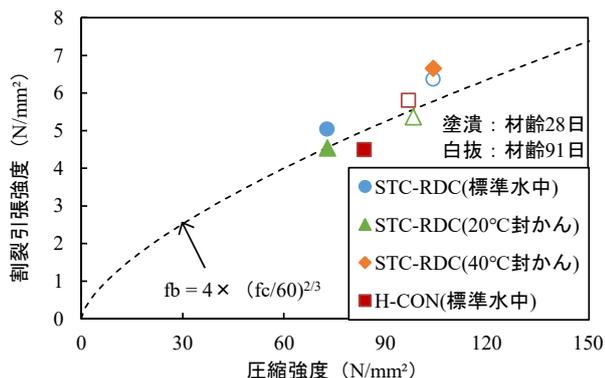


図-11 圧縮強度と割裂引張強度との関係

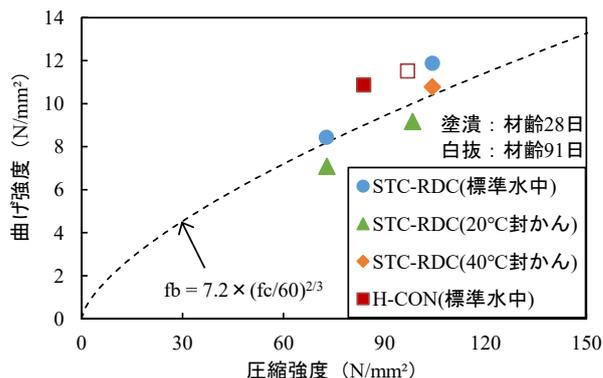


図-12 圧縮強度と曲げ強度との関係

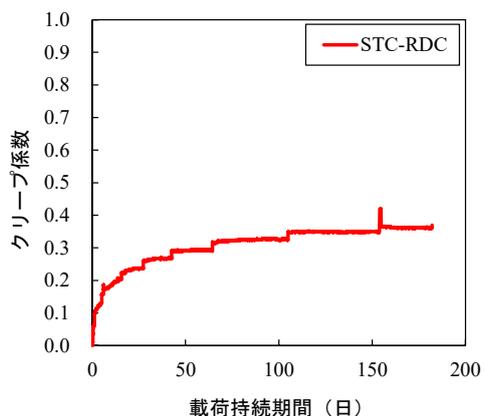


図-13 STC-RDC クリープ係数

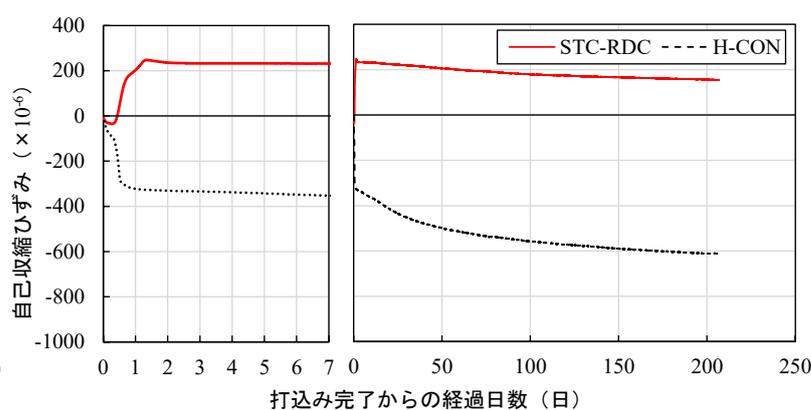


図-14 自己収縮ひずみ試験結果

(3) 静弾性係数

圧縮強度と静弾性係数との関係を図-9、図-10 に示す。H-CON の静弾性係数は JASS 5 に示される推定式⁶⁾の近傍にプロットされた。一方、STC-RDC の静弾性係数は推定式より与えられた値よりも高い結果となり、STC-RDC は、圧縮強度が同程度のセメントコンクリートに比べて静弾性係数が高いことが分かった。

(4) 割裂引張強度、曲げ強度

割裂引張強度試験および曲げ強度試験は材齢 28、91 日に行った。STC-RDC は標準水中、20°C封かんおよび 40°C封かん、H-CON は標準水中とし、養生方法は図-4 に示すものとした。なお、STC-RDC の 40°C封かんは材齢 28 日のみ試験を実施した。

圧縮強度と割裂引張強度との関係を図-11 に、圧縮強度と曲げ強度との関係を図-12 に示す。併せて、高強度コンクリートの圧縮強度と各強度の推定式⁷⁾をそれぞれの図中に示す。

STC-RDC と H-CON の圧縮強度と各強度との関係は、おおむね同様の傾向にあり、STC-RDC の割裂引張強度と曲げ強度は、従来の高強度コンクリートと同じように、圧縮強度を指標として推定できることが分かった。

(5) クリープ性状

クリープ試験は JIS A 1157 に準拠し、φ100×200mm の円柱供試体を用いた。打込み直後から材齢 48 時間まで 20°C環境で静置し、材齢 7 日まで標準水中を行った。その後、温度 20°C、60%RH の環境で養生を行い、材齢 28 日から荷重を開始した。荷重応力度は、クリープ試験用供試体と同一養生を行った円柱供試体の圧縮強度の 1/3 とした。なお、試験は STC-RDC のみで行った。

算出したクリープ係数を図-13 に示す。STC-RDC のクリープ係数は荷重持続期間 182 日でおおよそ 0.4 となった。

(6) 収縮性状

a) 自己収縮ひずみ

20°C封かん条件における自己収縮ひずみを図-14 に示す。供試体寸法は□100×400mm とし、熱電対内蔵埋込型ひずみ計で測定した。ひずみの起点は打込み直後とし、線膨張係数を $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ と仮定して見掛けの温度ひずみを除去した。

H-CON の材齢 182 日の自己収縮ひずみは約 600×10^{-6} となった。一方、STC-RDC は初期に膨張側に挙動し、その後、わずかに収縮側に挙動する結果となった。

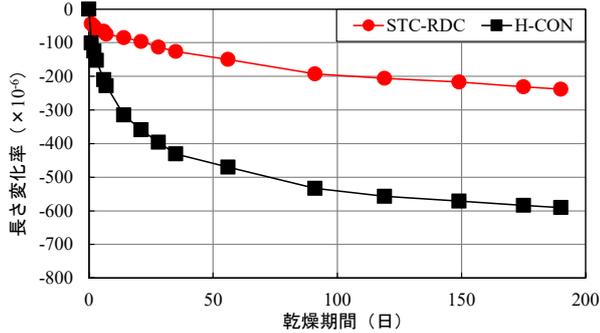


図-15 長さ変化率試験結果

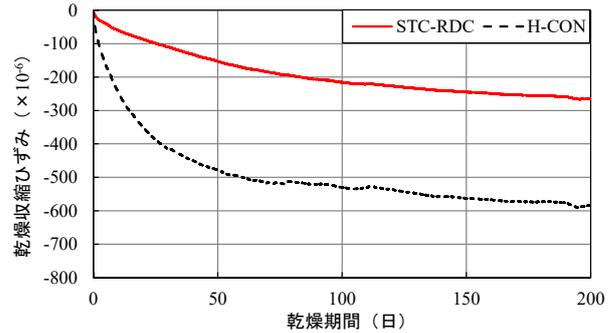


図-16 乾燥収縮ひずみ試験結果

b) 長さ変化率, 乾燥収縮ひずみ

JIS A 1129-2 に準じて測定した長さ変化率を図-15 に示す。供試体は材齢2日から20℃の水中に浸漬し、材齢7日から温度20℃、60%RHの環境(気中環境)に存置した。また、前述した自己収縮ひずみの測定と同じ条件の供試体を、材齢7日から封かんを解いて温度20℃、60%RHの環境に存置した際の、乾燥開始時点を起点としたひずみ変化を図-16に示す(乾燥収縮ひずみと称する)。

乾燥期間182日の長さ変化率と乾燥収縮ひずみを見ると、H-CONでは約600×10⁻⁶、STC-RDCでは約250×10⁻⁶となり、STC-RDCの収縮ひずみは非常に小さいことが確認された。乾燥期間272日における長さ変化率試験用供試体を写真-4に示す。STC-RDCの外観は脱枠時のきれいで平滑な状態からほとんど変化はなく、微細な表面ひび割れも確認されていない。

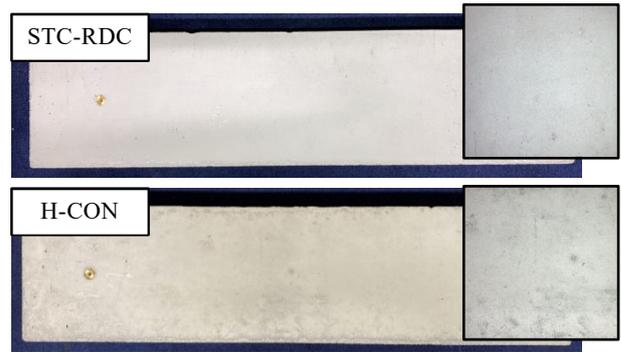


写真-4 乾燥期間272日 長さ変化率試験用供試体

謝辞：本報告にあたり、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。ここに深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 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
- 2) 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
- 3) 松田拓ほか：細骨材の違いが超高強度コンクリートの性状に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.37, No.1, pp.1117-1122, 2015
- 4) 日本コンクリート工学会：超流動コンクリート研究委員会報告書，1994.5
- 5) T.Matsuda ほか：Properties and Hardening Mechanism of Ultralow Shrinkage and High Strength Zero-Cement-Concrete, 17th fib Symposium Proceedings 2020
- 6) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事 2018, pp.12, 2018.7
- 7) 野口貴文，友澤史紀：高強度コンクリートの圧縮強度と各種力学特性との関係，日本建築学会構造系論文集 第472号，pp.11-16, 1995.6

4. まとめ

以下に、STC-RDCの各試験結果のまとめを示す。

- ① 水結合比が同程度の超高強度コンクリートと同様のフレッシュ性状であり、安定した製造が可能であることが確認された。
- ② 従来のコンクリートと同様に養生温度が高いほど圧縮強度が増加する傾向であるが、積算温度を指標とした圧縮強度の統一的な評価は難しい。
- ③ 一般的な高強度コンクリートに比べて長期強度の増進が大きい。
- ④ 圧縮強度が同程度のコンクリートに比べて、静弾性係数が高い。
- ⑤ 割裂引張強度と曲げ強度は高強度コンクリートと同様に圧縮強度を指標とした推定が可能である。
- ⑥ クリープ係数は載荷持続期間182日で約0.4となった。
- ⑦ 自己収縮ひずみと乾燥収縮ひずみは非常に小さい。