

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 長期材齢における力学特性・収縮性状・クリープ性状—

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

— Part4 Mechanical Characteristics, Creep and Shrinkage Properties in Long-term Age —

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、室内試験により材齢1年における力学特性、収縮性状およびクリープ性状を確認した。その結果、1) 一般的な高強度コンクリートに比べ圧縮強度の増進が大きく、静弾性係数が高いこと、2) 材齢1年においても乾燥収縮ひずみおよび自己収縮ひずみが非常に小さいこと、3) 載荷持続期間1年におけるクリープ係数が約0.4であることが確認された。

キーワード：ポルトランドセメント不使用、高強度コンクリート、長期材齢、力学特性、収縮性状
クリープ性状

For practical use of ultra-low shrinkage and high strength concrete without portland cement as a precast concrete member, mechanical characteristics, shrinkage properties and creep in the age of one year were confirmed by laboratory tests. As a result, the followings were confirmed;1) Compared to general high-strength concrete, increase in compressive strength was large, and static modulus of elasticity was high, 2) In the age of one year, the dry shrinkage strain and the self-shrinkage strain were very small, 3) In the loading term of one year, creep coefficient was about 0.4.

Key Words: Non-portland cement, High-strength concrete, Long-term age, Mechanical characteristics, Shrinkage, Creep

1. はじめに

近年、持続可能な社会の実現に向けて、二酸化炭素（以下、CO₂と称す）排出量削減の取り組みが進められている。建設分野では、主要資材であるコンクリートの使用によるCO₂排出量が着目されている。コンクリートの使用に伴うCO₂排出量のうち、ポルトランドセメント（以下、セメントと称す）の製造に起因する割合が大きく、産業副産物をセメント代替材料として使用したコンクリートの検討が注目されている。

筆者らは、産業副産物を活用して使用材料由来のCO₂排出量の低減を図り、セメントを使用せずとも製造可能な超低収縮・高強度コンクリート（以下、サスティンクリート（STC）と称す）を開発した¹⁾²⁾。STCの配（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。また、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は、フェロニッケルスラグ細骨材（以下、FNSと称す）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³⁾。

表-1 コンクリートの配 (調) 合

名称	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
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	物性値
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 (BET法) : 20.0m 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
H-CON	AF	空気量調整剤	アルキルエーテル系
	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 I 種	ポリカルボン酸エーテル系

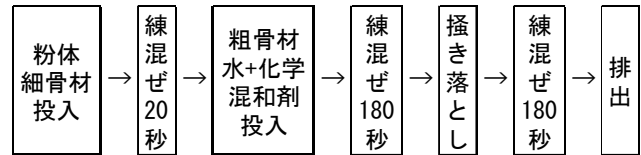


図-1 練混ぜ手順

表-3 試験項目および試験方法

試験項目	試験方法	試験項目	試験方法
圧縮強度	JIS A 1108	乾燥収縮ひずみ	参考文献5)
静弾性係数	JIS A 1149	自己収縮ひずみ	参考文献5)
乾燥収縮ひずみ	JIS A 1129-2	圧縮クリープ	JIS A 1157

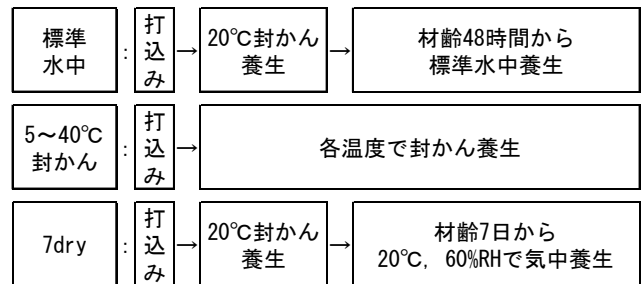


図-2 供試体の養生方法

本報では、STCのうちセメントを使用しない配 (調) 合 (以下、STC-RDC と称す) を対象にして、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長期材齢における力学特性、収縮性状およびクリープ性状を室内試験で確認した。また、材齢 28 日の圧縮強度が STC-RDC と同程度の一般的な高強度コンクリート (以下、H-CON と称す) を用いて、力学特性と収縮性状の比較検討を行なった。

2. 試験概要

(1) 配 (調) 合および使用材料

コンクリートの配 (調) 合を表-1 に、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、細骨材には FNS を使用した。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で製造して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 である。なお、STC-RDC のフレッシュコンクリート試験結果は既報⁴⁾ に示す通りであり、スランプフローは目標値とした 60±10cm を、空気量は目標値とした 3.5±1.5% を満たす結果となった。

(2) 試験項目および試験方法

試験項目および試験方法を表-3 に示す。力学特性の確認として圧縮強度と静弾性係数を測定した。供試体の養生方法を図-2 に示す通りであり、標準水中養生では、打込み完了直後から 20℃封かん養生を行い、材齢 48 時間から養生を開始した。封かん養生は、温度 5℃、10℃、20℃、40℃とし、打込み完了直後から各温度で養生した。乾燥条件の養生 (以下、7dry と称す) は、材齢 7 日まで 20℃封かん養生を行い、その後は温度 20℃、相対湿度 60% の条件とした。

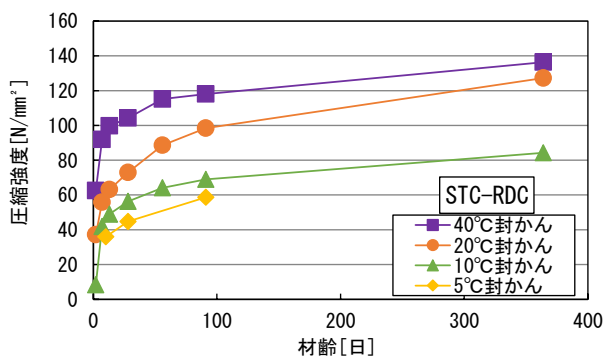


図-3 圧縮強度試験結果 STC-RDC 封かん養生

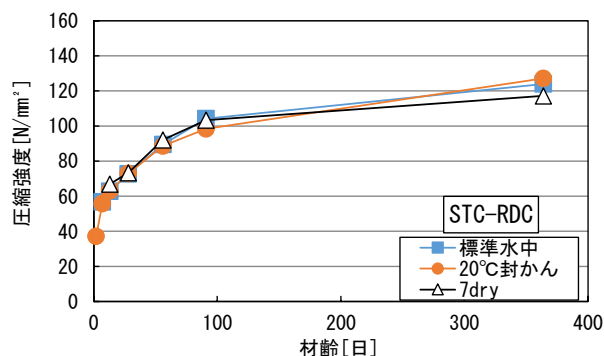


図-4 圧縮強度試験結果 STC-RDC 温度 20°C条件

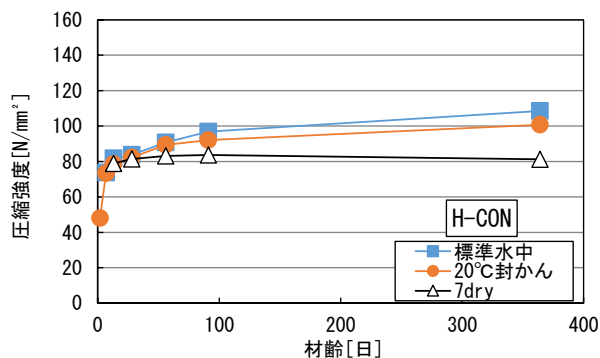


図-5 圧縮強度試験結果 H-CON 温度 20°C条件

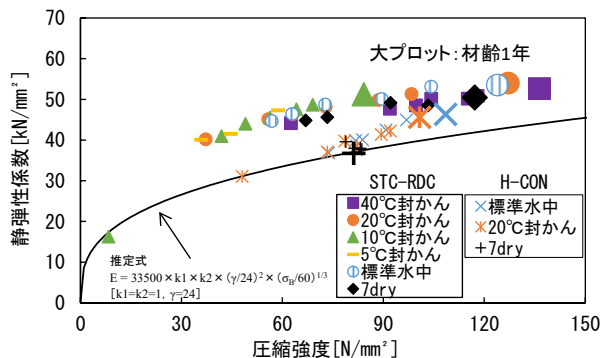


図-6 圧縮強度と静弾性係数との関係

収縮性状の確認として、自己収縮ひずみと乾燥収縮ひずみを測定した。なお、乾燥収縮ひずみは2つの方法で測定を行なった。

自己収縮ひずみの測定は、高流動コンクリートの自己収縮試験方法⁵⁾(以下、自己収縮試験方法と称す)を参考に、熱電対内蔵埋込型ひずみ計(以下、ひずみ計と称す)を用いて行なった。供試体寸法は100×100×400mmとし、温度20°Cの封かん状態における打込み直後からのひずみを測定した。なお、線膨張係数を $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ と仮定して温度ひずみを除去した。

乾燥収縮ひずみの測定は、JIS A 1129-2に準じた方法(以下、JIS法と称す)と、自己収縮試験方法を参考に、ひずみ計を用いた方法で行なった。供試体寸法は100×100×400mmとし、打込み直後から温度20°Cで封かん養生を行なった。JIS法では材齢48時間で脱型して材齢7日まで標準水中養生を行なった。ひずみ計を用いた方法は材齢7日に脱型した。両測定方法ともに材齢7日以降の養生条件は、温度20°C、相対湿度60%の環境とした。なお、ひずみの起点は乾燥開始時の材齢7日とした。

圧縮クリープ試験はJIS A 1157に準拠して行なった。供試体は $\phi 100 \times 200\text{mm}$ の円柱供試体とし、打込み直後から封かん状態で温度20°Cの環境で養生を行ない、材齢48時間で脱型し、材齢7日まで標準水中を行なった。その後、温度20°C、相対湿度60%の環境で養生し、材齢28日から荷重を開始した。荷重応力度は、圧縮クリ

ープ試験用供試体と同一養生を行なった円柱試験体の荷重時における圧縮強度の1/3とした。なお、試験はSTC-RDCのみで実施した。

3. 試験結果

(1) 圧縮強度

各温度で封かん養生を行なったSTC-RDCの圧縮強度試験結果を図-3に示す。材齢1年まで養生温度によらず圧縮強度の増進が確認された。次に、温度20°Cの条件において、水分供給の条件が異なる標準水中、封かん、7dryの養生を行なったSTC-RDCとH-CONの圧縮強度試験結果をそれぞれ図-4、5に示す。STC-RDCは材齢1年まで養生条件によらず同等の強度発現を示した。材齢91日から材齢1年にかけての強度増進は標準水中、20°C封かん、7dryでそれぞれ約20、29、14N/mm²であった。一方、H-CONの同期間での強度増進は標準水中と20°C封かんそれぞれ約12、9N/mm²となり、7dryでは強度増進が見られなかった。既報⁴⁾では、STC-RDCの強度増進に水分供給の条件が与える影響は非常に小さいことを確認しており、材齢1年においても同様の傾向が確認された。

(2) 静弾性係数

圧縮強度と静弾性係数との関係を図-6に示す。既報⁴⁾

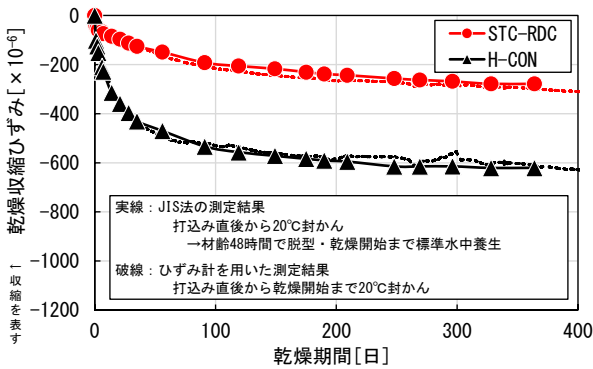


図-7 乾燥収縮ひずみ

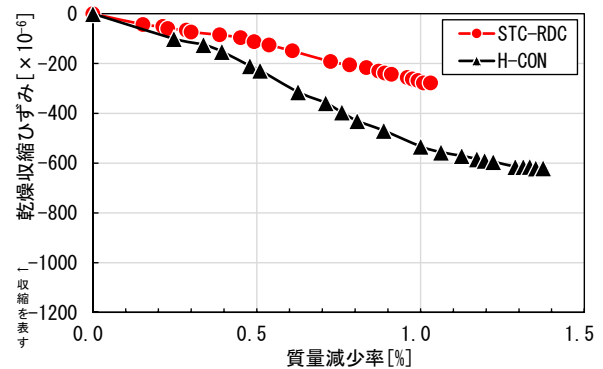


図-8 質量減少率と乾燥収縮ひずみとの関係

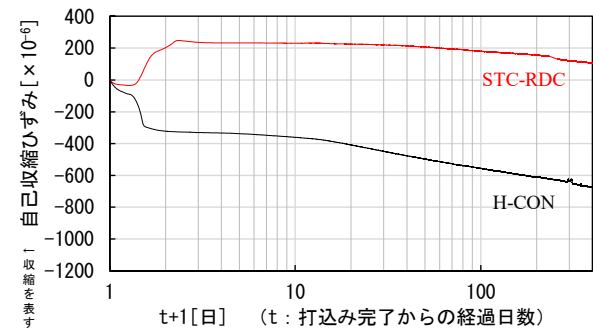


図-9 自己収縮ひずみ

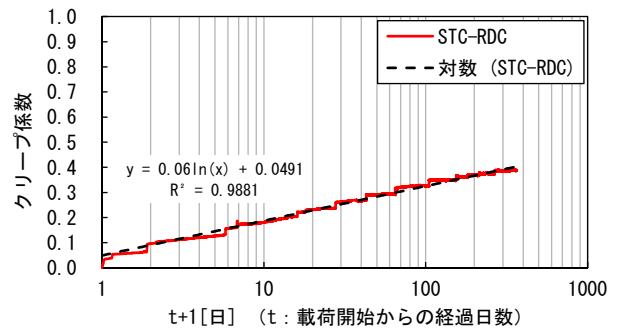


図-10 クリープ係数

と同様に、材齢1年でも STC-RDC の静弾性係数は JA SS5 に示される推定式⁹⁾より与えられた値よりも高いことが確認された。一般的な圧縮強度の範囲において、FNS を使用すると静弾性係数が大きくなる傾向⁷⁾にあり、本実験より高強度の範囲においても同様の傾向が確認された。また、圧縮強度の増加に伴って静弾性係数も増加していることが確認された。

(3) 収縮性状

JIS 法とひずみ計で測定した乾燥収縮ひずみを図-7 に示す。乾燥期間1年の両測定結果は、H-CON で約 600×10^{-6} 、STC-RDC で約 250×10^{-6} となり、H-CON に比べて STC-RDC の乾燥収縮ひずみは非常に小さいことが確認された。また、乾燥開始までの養生条件が異なるものの、JIS 法およびひずみ計を用いて測定した乾燥収縮ひずみは同様の結果となった。ひずみ計を用いた本測定は自己収縮試験方法を参考にしたものの、JIS 法と同じように乾燥収縮ひずみを評価できる可能性が確認された。

次に、JIS 法で測定した供試体の質量減少率と乾燥収縮ひずみとの関係を図-8 に示す。H-CON に比べて STC-RDC のほうが質量減少率は小さく、乾燥期間1年の質量減少率は STC-RDC が約 10%、H-CON が約 14%であった。STC-RDC の乾燥収縮ひずみが小さい要因の一つとして、水分の逸散が少ないことが考えられた。

ひずみ計を用いて測定した自己収縮ひずみを図-9 に

示す。H-CON の材齢1年の自己収縮ひずみは約 670×10^{-6} となった。一方、STC-RDC は初期に膨張側に挙動した後に収縮側に転じているものの、材齢1年でも収縮を示しておらず、自己収縮ひずみは非常に小さいことが確認された。

(4) 圧縮クリープ

圧縮クリープ試験結果から算出したクリープ係数を図-10 に示す。STC-RDC のクリープ係数は載荷持続期間1年でおおよそ 0.4 となり、クリープ係数が対数的に増加することが確認された。

国内外の指針等⁸⁾に示されるクリープ予測式は様々あり、例えば ACI-209 モデル⁸⁾や JSCE モデル⁹⁾が挙げられるが、STC-RDC のようにセメントを使用しないコンクリートの予測式や知見はない。既往研究¹⁰⁾に示される圧縮強度が同程度のコンクリートのクリープ係数と比較すると、STC-RDC のクリープ係数のほうが小さく、超高強度コンクリートと同程度となっている。クリープ係数はクリープひずみを弾性ひずみで除して得られる値である。一般的に、乾燥収縮ひずみとクリープひずみの進行過程は相似である¹¹⁾とされている。つまり、乾燥収縮ひずみが小さいほどクリープひずみは小さくなり、クリープ係数も小さくなる傾向にある。STC-RDC のクリープ係数が小さい要因として、乾燥収縮ひずみが非常に小さいことが一因として考えられる。しかし、先述し

たようにクリープ係数には弾性ひずみが直接的に関わっていることに加えて、水結合材比や単位セメントペースト量などの多くの要因が影響を与えている¹²⁾。STC-RDCのクリープ性状について、今後、より詳細な検討を実施する予定である。

4. まとめ

STC-RDCの長期材齢（材齢1年）における圧縮強度、静弾性係数、収縮ひずみ、圧縮クリープについて以下の知見を得た。

- ① 長期材齢における圧縮強度の増進は、一般的な高強度コンクリートよりも大きく、水分の供給条件の違いによるその差は小さいことが分かった。
- ② 静弾性係数は、長期材齢でも推定式よりも高くなった。また、圧縮強度の増加に伴って静弾性係数も増加した。
- ③ 乾燥期間1年における乾燥収縮ひずみは非常に小さく、水分の逸散が少ないことが要因の一つと考えられた。
- ④ 長期材齢においても自己収縮ひずみは非常に小さいことが分かった。
- ⑤ クリープ係数は載荷持続期間1年で約0.4となった。

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) 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, pp.27-32,2022.10
- 5) 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
- 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) 土木学会：フェロニッケルスラグ骨材を用いたコンクリートの設計施工指針，pp.11,2016.7
- 8) ACI Committee 209：Prediction of Creep, Shrinkage and Temperature Effects in Concrete Structure
- 9) 土木学会コンクリート委員会：2002年制定コンクリート標準示方書 [構造性能照査編]，p.36,2022.3
- 10) 陣内浩ほか：180N/mm²クラスまでの高強度コンクリートの各種強度と長期力学特性，セメント・コンクリート論文集，No.57, pp.44-49,2003
- 11) 日本建築学会：プレストレストコンクリート設計施工規準・同解説，pp.109,1998
- 12) 長瀧重義ほか：高強度コンクリートの乾燥収縮及びクリープの特性，コンクリート工学，Vol.1.20, No.4, pp.75-87, 1982.4