

セメントを用いない超低収縮高強度繊維補強コンクリートの 材齢4年までの強度特性

Mechanical Properties of Ultra-low Shrinkage High-strength Fiber Reinforced Concrete without Portland Cement up to 4 Years

R&D センター 佐々木 亘 WATARU SASAKI
R&D センター 篠崎 裕生 HIROO SHINOZAKI
R&D センター 松田 拓 TAKU MATSUDA

近年、CO₂ 排出量削減に関する取り組みが急務となり、建設産業においても様々な検討がなされている。筆者らはポルトランドセメントを用いなくても高い強度を発現でき、かつ収縮量も極めて小さいコンクリートを開発した。さらに、高耐久性による供用中の CO₂ 排出量低減も目指し、このコンクリートと短繊維による鉄筋の省略や FRP 技術を組み合わせた PC 桁を実際に架設し検証を行なっている。本稿では、この取り組みのうち、実環境における材齢 2～4 年までの強度特性の変化について確認した結果を報告する。確認の結果、強度特性に大きな変化は確認されず、圧縮強度やひび割れ発生強度は材齢の経過に伴って徐々に増進している傾向にあることがわかった。

キーワード：ゼロセメント、短繊維補強コンクリート、屋外暴露、長期材齢

In recent years, efforts to reduce CO₂ emissions have become an urgent issue, and various studies are being conducted in the construction industry. The authors have developed a concrete that has high strength and extremely low shrinkage without using Portland cement. Furthermore, with the aim of reducing CO₂ emissions during service due to high durability, we are actually erecting and verifying PC girders that combine short fibers and FRP reinforcement to omit rebars. This paper reports the results of confirming the mechanical properties from two to four years of age in the actual environment. As a result, no significant change in mechanical properties was confirmed, and it was found that the compressive strength and crack strength tended to increase gradually with the aging of the material.

Key Words: Portland cement free, Fiber reinforced concrete, Outdoor exposure, Long term age

1. はじめに

近年、CO₂ 排出量削減に関する取り組みが急務となり、建設産業においても様々な検討がなされている。コンクリート材料においては、例えば、一般的な RC 構造物への適用を想定した強度域のコンクリートを中心に産業副産物由来の混和材の使用量を高める検討が活発に行われ、土木学会から指針案も発刊されている¹⁾。そのような中、筆者らは、超高強度コンクリートをベースとして粉体および細骨材に産業副産物を使用することで、ポルトランドセメントを用いない条件でも高い強度を発現でき、かつ収縮量も極めて小さいコンクリートを開発した²⁾。さらに、高耐久化による供用中の CO₂ 排出量削減も目指し、

このコンクリートと短繊維による鉄筋の省略や FRP 緊張材を組み合わせた PC 桁（以下、実証桁と呼ぶ）を実際に製作・架設し検証を行っている^{3), 4)}。本稿はこの取り組みのうち、実証橋製作時に採取し屋外環境に暴露した供試体による、材齢4年までの強度特性について報告するものである。

2. 実証桁およびコンクリートの概要

図-1 に実証桁の概要、写真-1 に架設時の状況を示す。この桁は、コンクリート製品工場（栃木県下野市）から国道への出入り口に架設されているプレテンション合成桁橋を構成する桁の1つである。本橋梁は元々、補強材・

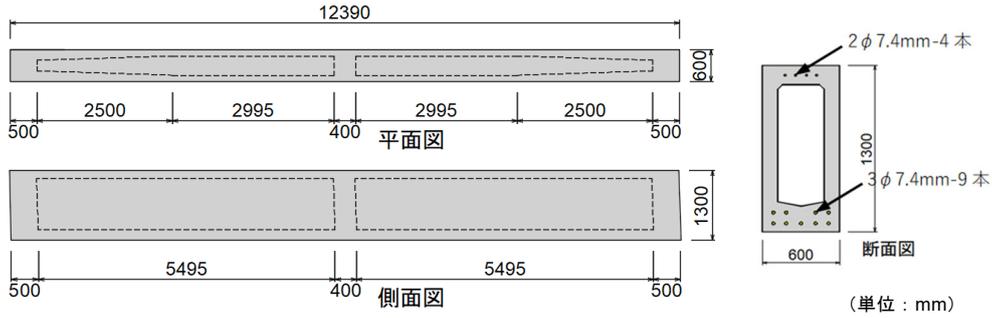


図-1 実証桁の概要



写真-1 実証桁の架設状況



写真-2 スランプフローの一例

表-1 コンクリートの材料および配合

| 配合指標 | | | | 単位量 [kg/m ³] | | | | | | | |
|------------------|---|------------|---------|--------------------------|-----|-----|-----|----|-----|-----|------|
| 水結合材比 W/B [%] | 単位粗骨材 絶対容積 [m ³ /m ³] | 短繊維混入率 [%] | 空気量 [%] | W | B | | | | S | G | Fb |
| | | | | | BF | FA | SF | Ex | | | |
| 12.0 | 0.200 | 1.0 | 3.0 | 100 | 447 | 244 | 122 | 20 | 974 | 526 | 78.5 |

【使用材料】BF：高炉スラグ微粉末 4000（密度 2.88 g/cm³），FA：フライアッシュ I 種（密度 2.35 g/cm³），SF：シリカフェーム（密度 2.27 g/cm³），Ex：膨張材（密度 3.19 g/cm³），S：フェロニッケルスラグ細骨材（表乾密度 2.90 g/cm³），G：硬質砂岩砕石 2005（表乾密度 2.63 g/cm³），Fb：φ 0.2×15mm 鋼繊維（密度 7.85 g/cm³）

緊張材にアラミド FRP ロッドを用いることで鋼材を使用しない橋梁として 1990 年に建設されたもの⁵⁾であるが、3 本の桁のうちの 1 本を建設から 28 年経過した 2018 年に撤去して耐荷力の確認やアラミド FRP ロッドの化学分析などを行なった⁶⁾。本実証桁はこの撤去した桁の代わりに、セメントを用いない超低収縮高強度繊維補強コンクリートとアラミド FRP 緊張材を組み合わせた桁を 2019 年に製作し架設したものである⁴⁾。

表-1 に実証桁に用いたコンクリートの材料および配合を示す。結合材として高炉スラグ微粉末、フライアッシュ、シリカフェームおよび膨張材を組み合わせており、大部分が産業副産物由来の粉体である。細骨材にも産業副産物であるフェロニッケルスラグ細骨材を使用している。短繊維には超高強度繊維補強コンクリート（以下、UFC）⁷⁾で用いられる細径の鋼繊維を用いている。本配合

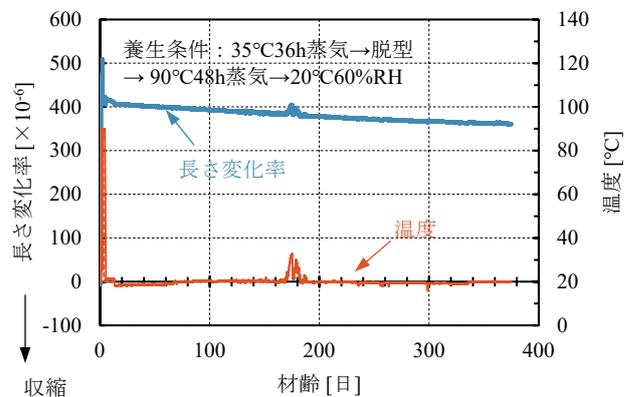


図-2 長さ変化率の測定結果の一例

は短繊維補強コンクリートであり、かつ単位水量が非常に小さいが、写真-2 に示すように、フレッシュ時のスランプフローは 600～700 mm 程度を確保できる。実証桁製

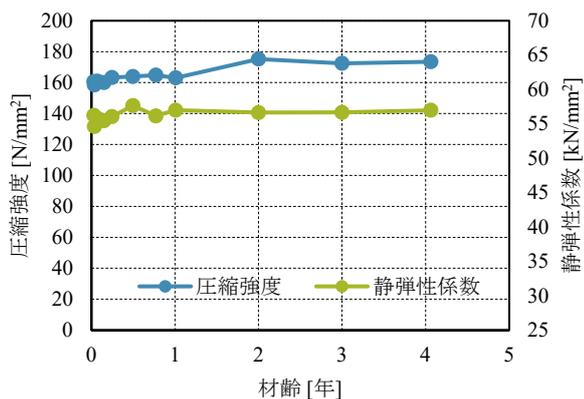


図-3 圧縮強度および静弾性係数の経時変化

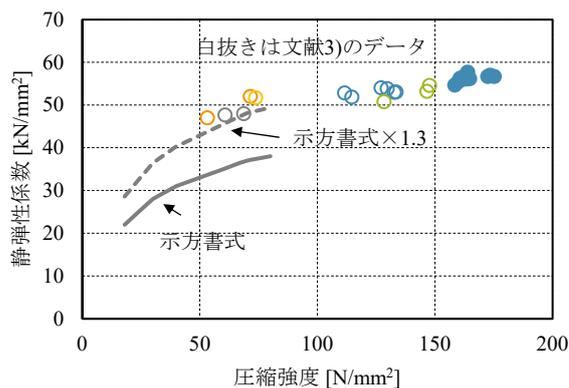


図-4 圧縮強度と静弾性係数の関係

作時には、前置き後 35°C36 時間の一次養生と 90°C48 時間の二次養生という二段階の蒸気養生を行なった。この養生により、ポルトランドセメントを用いないコンクリートでありながら、材齢 6 日で 150 N/mm² 程度の圧縮強度を発現する。また、このような高い圧縮強度を発現しながら収縮ひずみを生じないことも大きな特徴の一つである。図-2 に 100×100×400 mm の角柱供試体に埋込み型ひずみ計を埋め込んで測定した、打ち込み直後からの長さ変化率の一例を示す。一次養生中に膨張側へ推移した後、二次養生では若干収縮側への挙動が見られるのみでその後の収縮ひずみは小さく、打ち込み直後を起点とした場合の長さ変化率は膨張側で推移するような挙動を示した。また、コンクリートの圧縮クリープや桁自体の長さ変化も非常に小さく寸法安定性に優れており⁴⁾、プレキャスト部材として用いた際に、現地で接続する他の構造物等に与える影響が小さい部材となっていると言える。

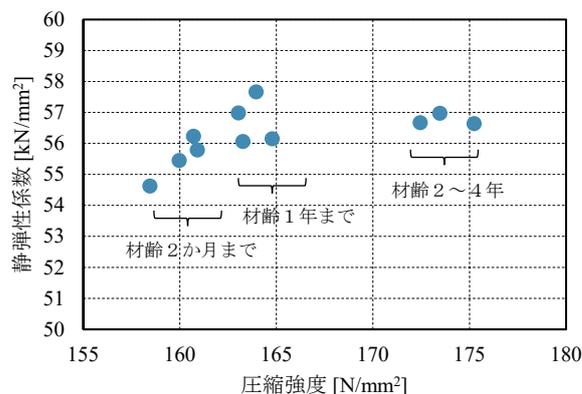


図-5 圧縮強度と静弾性係数の関係 (拡大)

3. 長期強度の測定

(1) 測定方法

実証桁の製作と同時期に、同じ方法でコンクリートを練り混ぜ、φ100×200 mm 円柱供試体、100×100×400 mm 角柱供試体を採取し、実証桁と同様の養生を行った。その後、千葉県流山市の雨掛かりのある屋外環境に暴露し、所定の材齢毎に試験室にて圧縮強度および静弾性係数、ひび割れ発生強度、引張軟化特性の測定を行なった。

ひび割れ発生強度は、UFC 指針⁷⁾を参考に、割裂引張強度試験において供試体端面のひずみを測定し、ひずみ変化が不連続になった応力をひび割れ発生強度とした。引張軟化特性は、JCI-S-002-2003 および JCI-S-001-2003 付属書に準じて、切欠きのあるはりの曲げ試験結果を逆解析することによって求めた。圧縮強度および静弾性係数は材齢 4 年、ひび割れ発生強度は材齢 3 年、引張軟化特性は材齢 2 年まで測定を行なった。

(2) 測定結果

図-3 に圧縮強度および静弾性係数の経時変化を示す。蒸気養生終了直後は 160 N/mm² 程度であったが、材齢 4 年では 170 N/mm² を超える程度となっている。4 年の間に大きな変化はなく、先述の蒸気養生を行なうことで、以降の圧縮強度は極めて安定した値を示すことがわかる。

蒸気養生終了直後から材齢 4 年までの静弾性係数の測定値は 55~57 kN/mm² であり、ほとんど変化は認められなかった。

図-4 に圧縮強度と静弾性係数の関係を示す。図中には参考として、コンクリート標準示方書に示される圧縮強度とヤング係数の関係式から求められる値、ならびにその値を 1.3 倍した値も併せて示した。さらに、配合検討時のデータである文献 3) のデータ (図中の白抜き) も示している。圧縮強度静弾性係数の関係は、配合検討時の値と同様に、おおむね示方書式の 1.3 倍が示す曲線の延長線上にあり、材齢 4 年までの範囲ではその関係に大きな変化も生じていないようである。

図-5 は図-4 に示したデータの内、今回取得したデータを拡大して示したものである。この図からは、概ね材齢 1 年までは圧縮強度の変化に応じて静弾性係数も変化

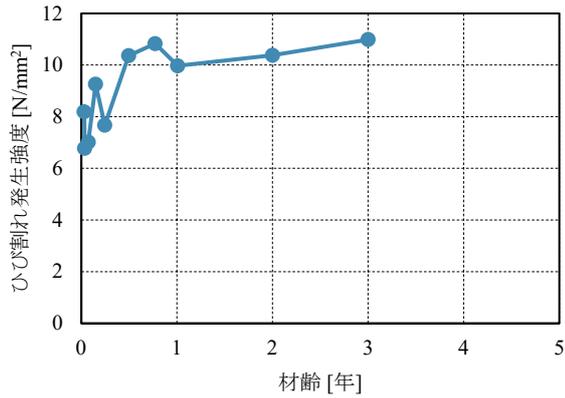


図-6 ひび割れ発生強度の経時変化

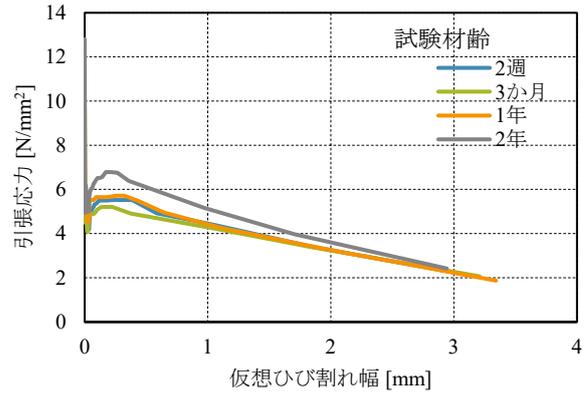


図-7 引張軟化特性の経時変化

しているように見える一方で、材齢2年以降は、圧縮強度が増加しても静弾性係数はほとんど変化していないように見える。前述の通り、圧縮強度および静弾性係数のどちらも値の変化は小さくなく、特に静弾性係数については極めて狭い範囲での値の変化であるため、供試体ごとのばらつきの影響である可能性が高い。また、現時点での数値の変化の範囲自体も、部材の構造性能に影響を与えるものではないと考えられる。しかし、ポルトランドセメントを用いない等、特殊な条件を有するコンクリートであるため、今後の追跡調査およびデータの蓄積により、実環境での経時による物性変化の傾向であるのか検討・確認していく必要があるものと考えられる。

図-6 にひび割れ発生強度の経時変化を示す。圧縮強度や静弾性係数に比べると、測定材齢によって値の変動が大きい経時的な変化の傾向も大きいようである。すなわち、蒸気養生直後は 8 N/mm^2 前後であったが、その後1年の間に 10 N/mm^2 程度に増加し、その後も漸増傾向にある。ひび割れ発生強度はその測定方法から、他の強度指標に比べて乾燥の影響が大きくなり⁹⁾、特に供試体表面の状態の影響が大きくなるものと考えられる。本稿に示したデータは、雨掛かりのある屋外に暴露した供試体のデータである。このコンクリートは、水分浸透に対する抵抗性が大きく¹⁰⁾、内部への水分の浸透深さは極めて小さいと考えられるが、雨掛かりによって表面の乾燥が防がれ、ひび割れ発生強度の増大に繋がった可能性がある。

図-7 に材齢2年までの引張軟化特性を示す。引張軟化特性はマトリクスの影響だけでなく、短繊維の影響が大きい。このコンクリートはポルトランドセメントを使用せず、高炉スラグ微粉末等の混和材を結合材として用いているため、類似の配合条件のコンクリート¹¹⁾と同様に細孔溶液中の pH は通常のコンクリートより小さくなっていると考えられる。pH が低下するとアノード反応が進みやすくなるため、マトリクス中の鋼材、このコンクリ

ートにおいては鋼繊維の腐食に対する抵抗性を低下させる可能性がある。一方で前述の通り、このコンクリートはマトリクス中への水分の浸透に対する抵抗性が非常に高い。さらに超低水結合材比であり組織が極めて緻密であることに鑑みると、鋼材への水や酸素の供給は相当に小さくなっていることが考えられる。このことはカソード反応を抑制するため、鋼材腐食を抑制する方向に働く。鋼繊維の腐食が進行すると引張軟化特性の低下に繋がると考えられるが、今回確認した範囲では、引張軟化特性における応力の低下や曲線の形状の変化は生じておらず、引張軟化特性に影響を与えるような鋼繊維の腐食は生じていないと考えられる。

4. まとめ

ポルトランドセメントを用いない超低収縮高強度繊維補強コンクリートについて、雨掛かりのある屋外環境に暴露した供試体を用いて材齢4年までの各種強度特性を調べた。その結果、以下の知見を得た。

- ① 圧縮強度および静弾性係数はそれぞれ材齢4年まで大きな変化はなく、圧縮強度はどちらかというところ漸増傾向にある。
- ② ひび割れ発生強度は材齢1年までの間に 8 N/mm^2 から 10 N/mm^2 程度まで増加し、その後も漸増傾向にある。
- ③ 引張軟化特性に大きな変化はなく、鋼繊維やマトリクスに問題となるような変化は生じていない。

今後も引き続き調査を継続し、強度特性に与える実環境での時間経過の影響を確認・検討していく予定である。

参考文献

- 1) 土木学会:混和材を大量に使用したコンクリート構造物の設計・施工指針(案), 2018.9
- 2) Matsuda, T., Noguchi, T., Kanematsu, M. & Mine, R.:

- Ultralow Shrinkage and High Strength Concrete without Portland Cement, Proceedings of the fib congress 2018
- 3) 佐々木亘, 松田拓, 恩田陽介, 基哲義: プレテンション部材へ適用可能な超低収縮高強度繊維補強コンクリートの開発, 第28回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp. 673-678, 2019. 11
 - 4) 篠崎裕生, 佐々木亘, 三加崇, 松田拓: サステナビリティを追求したPC橋梁の試み, コンクリート工学, Vol. 59, No. 6, pp. 511-518, 2021. 6
 - 5) 則武邦具, 板井栄次, 新井英雄, 益子博志: アラミドFRP プレテン橋の設計と施工, 第1回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp. 261-264, 1990
 - 6) Yuji Nonami, Takashi Sanga, Taisuke Fujioka, Hiroshi Asai: Bending property of full size PC girder using AFRP rods as pretension tendon which passed 28 years after construction, Proceedings of the fib symposium 2019
 - 7) 土木学会: 超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針(案), 2004. 9
 - 8) 土木学会: 2022年制定コンクリート標準示方書[設計編], 2023. 3
 - 9) 佐々木亘, 谷口秀明, 樋口正典, 宮川豊章: 短繊維補強コンクリートのひび割れ発生強度に与える養生方法の影響, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレードシンポジウム論文報告集, 第13巻, pp. 33-40, 2013. 11
 - 10) 恩田陽介, 佐々木亘, 松田拓: ポルトランドセメントを使用しない超低収縮高強度繊維補強コンクリートの凍結融解抵抗性および物質透過抵抗性, 土木学会第76回年次学術講演会講演概要集, V-403, 2021. 9
 - 11) 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2022年度大会(北海道)学術講演梗概集, pp. 665-666, 2022. 9