

産業副産物を大量に使用した超低収縮・超高強度繊維補強コンクリート —鋼繊維を用いた「サスティンクリート」の開発—

Ultra-low Shrinkage and Ultra-high-strength Fiber Reinforced Concrete Containing High-volume Industrial By-products
- Development of “Sustain-crete” Containing Steel Fibers -

技術研究所 佐々木 亘 WATARU SASAKI
技術研究所 松田 拓 TAKU MATSUDA
技術研究所 恩田 陽介 YOSUKE ONDA
技術研究所 峯 竜一郎 RYUICHIRO MINE

産業副産物のさらなる有効利用が着目されるなか、筆者らの一部は、産業副産物を大量に使用した、極めて収縮の小さい高強度コンクリートを開発した。本稿ではこれをベースとした超低収縮・超高強度繊維補強コンクリートについての検討を行なった。その結果、 $\phi 0.2 \times 15$ mm の鋼繊維を 1.0 vol.% 使用する条件でも 100 kg/m^3 程度の単位水量で高い流動性を有すること、高温の蒸気養生により 1 週間程度で 150 N/mm^2 程度の圧縮強度を発現すること、このような条件でも収縮ひずみや圧縮クリープといった体積変化が相当に小さいことなどの知見を得た。

キーワード：混和材，フェロニッケルスラグ細骨材，短繊維，超低収縮

While focusing on the more effective use of industrial by-products, some of the authors developed ultra-low shrinkage and high-strength concrete using industrial by-products in large amount. This paper describes the results of examination of ultra-low shrinkage and ultra-high-strength fiber reinforced concrete based on the developed concrete. As a result of examination, it was obtained that the concrete has high flowability with a unit water content of about 100 kg/m^3 even under the condition of containing 1.0 vol.% of $\phi 0.2 \times 15$ mm steel fiber, that the compressive strength of the concrete develops 150 MPa in about 1 week by high-temperature steam treatment, and that even under such conditions, the volume change such as shrinkage or compressive creep is considerably small.

Key Words: supplementary cementitious materials, ferronickel slag sand, short fiber, ultra-low shrinkage

1. はじめに

近年、環境負荷低減への意識の高まりから、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混和材の使用量を高める検討が活発に行われ、土木学会より指針案¹⁾も発刊された。一方、筆者らの一部は、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、単位水量を大幅に低減することができ、収縮量も非常に小さい高強度コンクリートの開発に成功²⁾し、「サスティンクリート」と命名した。サスティンクリートは、結合材中のポルトランドセメントの割合を 0% を含めた範囲で任意に設定する

ことが可能であるのに加え、前述の指針案で想定されているコンクリートに比べて相当に高い圧縮強度を有するものである。他方、筆者らの研究グループでは、高強度繊維補強コンクリートを使用し鉄筋や PC 鋼材などを用いない高耐久な橋梁上部構造 (Dura-Bridge) の開発を行なっている^{3), 4)}。これら 2 つの研究成果を融合させることができれば、より高耐久かつ環境負荷の小さい構造物を実現できる可能性がある。

そこで本稿では、開発したコンクリートに短繊維を混入させることで、産業副産物を大量に使用した高強度繊維補強コンクリートとする検討を行なった。さらに、プレテンション PC 部材の製作を想定し、蒸気を用いた促

表-1 使用材料

材料		物性他	記号
結合材	高炉スラグ微粉末	密度 2.88 g/cm ³ , 4000 ブレーン, 比表面積 4,270 cm ² /g, SO ₃ : 2.06%	BF
	フライアッシュ	密度 2.40 g/cm ³ , JIS 1 種相当品, 比表面積 5,540 cm ² /g	FA
	シリカフューム	密度 2.24 g/cm ³ , 比表面積 17.0 m ² /g	SF
	膨張材	密度 3.19 g/cm ³ , CaO 系, 比表面積 4,970 cm ² /g	EX
細骨材	フェロニッケルスラグ	表乾密度 2.98 g/cm ³ , 吸水率 2.91%	S
粗骨材	硬質砂岩	表乾密度 2.63 g/cm ³ , 砕石 2005, 実積率 61.5%	G
化学混和剤	高性能減水剤	ポリカルボン酸系	SP
	消泡剤	エステル系	DF
短繊維	鋼繊維	密度 7.85 g/cm ³ , φ 0.2×15 mm, 引張強度 2000 N/mm ² 以上, 実積率 [*] 8.43%	Fb15
		密度 7.85 g/cm ³ , φ 0.2×22 mm, 引張強度 2000 N/mm ² 以上, 実積率 [*] 5.69%	Fb22

*短繊維の実積率は文献 6)による

表-2 ベースコンクリートの配合 (基準配合)

配合指標				単位量 [kg/m ³]										
W/B [%]	s/a [%]	単位粗骨材 絶対容積 Vg [m ³ /m ³]	空気量 [%]	結合材の質量割合			W	B				S	G	
				BF	FA	SF		BF	FA	SF	EX			
15.5	55.4	0.292	3.5	55	30	15	90	581	309	168	84	20	1079	768

進養生についても検討を行なった。

2. 配合要因がフレッシュ性状に与える影響

(1) 実験概要

表-1 に使用材料, 表-2 にベースとなるプレーンコンクリート (短繊維を用いないコンクリート) の配合を示す。既報において, ポルトランドセメントを使用せず, かつ, 非常に小さい収縮特性を示した配合を基本とした。この配合は, 15.5%という低い水結合材比 (W/B) であり, 単位水量 (W) が 90 kg/m³ と極めて小さく細骨材量が多い条件であっても十分な流動性が得られるものである。結合材として高炉スラグ微粉末 (BF), フライアッシュ (FA), シリカフューム (SF) および膨張材 (EX) を使用し, 細骨材 (S) には比較的吸水率の高いフェロニッケルスラグ細骨材 (FNS) を使用した。粗骨材 (G) は最大寸法 20 mm の硬質砂岩砕石を用いた。短繊維は UFC⁵⁾ で使用されることの多い細径の鋼繊維を使用することとした。

実験要因は W, W/B, 単位粗骨材絶対容積 (Vg) ならびに短繊維の種類および混入率 (Vf) である。基準配合における空気量 3.5%, EX = 20 kg/m³ および BF:FA:SF = 55:30:15 の条件は一定とした。コンクリートは公称容量 55 リットルの強制二軸ミキサで練り混ぜ, 練り直後のスランプフロー, 空気量, コンクリート温度の測定を行なった。

(2) 実験結果

表-3 に実験結果の一覧, 図-1 に短繊維かさ容積とス

ランプフローの関係を示す。ここで短繊維かさ容積とは, 粗骨材と同様の考え方により, 短繊維の実積率を測定し, 測定した実積率を使って計算されるコンクリート 1 m³ 中に含まれる短繊維のかさ容積である。筆者らは, 短繊維かさ容積を用いることで, 短繊維の種類や形状寸法および混入率がコンクリートの流動性に与える影響を一元的に評価できる可能性があることを報告している⁶⁾。図-1 には既報⁶⁾で示した短繊維かさ容積とスランプフローの関係のうち, 本実験の条件に比較的近い, W/B = 16%, Vg = 0.200 m³/m³ のデータをあわせて示した。この直線は化学混和材の使用量等によってマトリクスの流動性が変化すると平行移動する可能性が考えられるが, 本稿では短繊維がスランプフローに与える影響を議論する目的で, この直線の傾きと本実験データについて比較を行なう。

図-1 (a) より, 基準配合に短繊維を混入した W = 90 kg/m³ の条件では, 既報のデータに比べて短繊維かさ容積の増加に伴うスランプフローの低下が大きいことがわかる。また, Vg を増加させると, 短繊維と粗骨材が互いに流動を阻害して材料分離が生じた。一方, Vg を既報と同様に 0.200 m³/m³ とし, 単位水量も 120 kg/m³ まで増加させた条件では, 流動性が大きく改善し, また, 短繊維かさ容積の増加に伴うスランプフローの低下も既報と同程度となった。これらの結果より, Vg は既報と同程度の値に低減する必要があることや, 基準配合の単位水量では短繊維補強コンクリートとして流動性を確保するためのペースト量が少ないことが考えられる。ただし, この W/B = 15.5%かつ W = 120 kg/m³ という条件は, 既報と比べるとはるかに少ない単位ペースト絶対容積 (Vp)

表-3 配合およびフレッシュ試験結果

W/B [%]	W [kg/m ³]	Vp [m ³ /m ³]	Vg [m ³ /m ³]	s/a [%]	短繊維の種類	Vf [vol.%]	短繊維かさ容積 [m ³ /m ³]	SP [B×%]	スランプレ [cm]	スランプレフロー [mm]	フロー 500 mm 到達時間 [s]	空気量 [%]	コンクリート温度 [°C]
15.5	90	0.311	0.292	55.4	-	0.00	0.000	1.7	-	670	21.5	3.0	21.2
15.5	90	0.311	0.287	55.8	Fb15	0.50	0.059	1.9	-	550	80.7	2.5	21.8
15.5	100	0.346	0.276	55.4	Fb22	0.50	0.088	1.9	-	590	32.2	2.3	23.3
15.5	120	0.415	0.200	63.1	Fb15	0.75	0.089	1.9	-	763	7.2	3.0	21.1
15.5	100	0.346	0.325	46.9	Fb15	0.75	0.089	1.9	-	530	49.1	1.5	23.2
15.5	120	0.415	0.200	63.0	Fb15	1.00	0.119	1.9	25.5	695	14.8	2.3	19.6
15.5	120	0.415	0.200	63.0	Fb15	1.00	0.119	1.9	25.5	715	8.9	2.3	19.0
15.5	120	0.415	0.200	62.8	Fb15	1.25	0.148	1.9	-	640	22.4	2.5	24.0
12.0	100	0.418	0.200	62.9	Fb15	0.75	0.089	2.2	-	655	23	3.1	24.0
12.0	100	0.418	0.200	62.9	Fb15	0.75	0.089	2.4	-	570	30.3	2.8	22.4
12.0	130	0.543	0.200	51.5	Fb15	1.00	0.119	1.9	-	540	11.1	3.4	23.7
12.0	100	0.418	0.200	62.8	Fb15	1.00	0.119	2.4	-	595	30.9	3.1	23.9
12.0	100	0.418	0.200	62.8	Fb15	1.00	0.119	2.4	24.5	580	28.4	2.5	21.9
12.0	100	0.418	0.200	62.6	Fb15	1.25	0.148	2.4	22.5	500	-	2.5	22.2
12.0	100	0.418	0.200	62.4	Fb15	1.50	0.178	2.4	19.0	390	-	2.8	22.5
12.0	100	0.418	0.200	62.2	Fb15	1.75	0.208	2.4	15.5	365	-	2.2	22.8

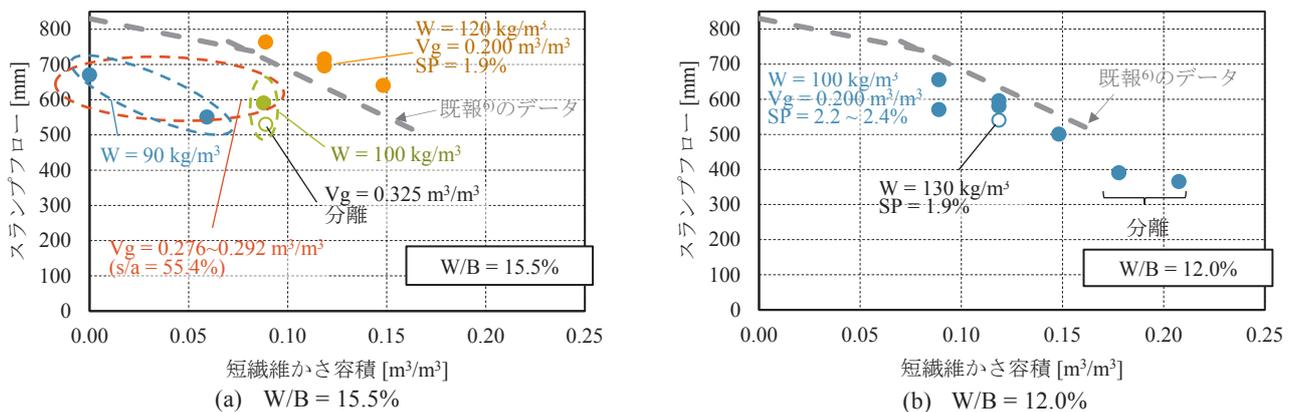


図-1 短繊維のかさ容積とスランプレフローの関係

となっており、短繊維補強コンクリートとしても、単位水量を大きく低減できるという本コンクリートの特徴は保持されていることがわかる。

図-1 (b)は単位水量を 100 kg/m³ に抑える一方で W/B を 12.0%に低減することでペースト量を確保した条件での結果である。短繊維かさ容積が相当に大きくなると材料分離が生じてしまうが、短繊維かさ容積が 0.15 m³/m³ (Fb15 であれば Vf = 1.25%) 程度までの範囲であれば、短繊維がコンクリートの流動性に与える影響は W/B = 15.5%, W = 120 kg/m³ の条件と概ね同様であった。これは、表-3 に示すように、良好な流動性が得られた W/B = 15.5%, W = 120 kg/m³ の条件とほぼ同様のペースト量となる条件である。以上の結果から、開発した、従来に比べて単位水量の著しく小さいコンクリートでも、一定のペースト量を確保することで短繊維が流動性に与える影響について従来の高強度コンクリートと同様に考えるこ

とが可能であること、また、その場合であっても、確保すべきペースト量は従来のコンクリートに比べて相当に小さい範囲であることがわかった。

3. 硬化コンクリートの特性と蒸気養生方法の検討

プレテンション PC 部材として実用化するためには、早期にプレストレスを導入可能とするための強度発現性が要求される。開発したコンクリートは混和材を大量に使用するため、初期の強度発現は相当に遅いものと考えられる。そこで、前章において良好なフレッシュ性状が得られた配合を中心に、蒸気による促進養生方法について検討を行なった。

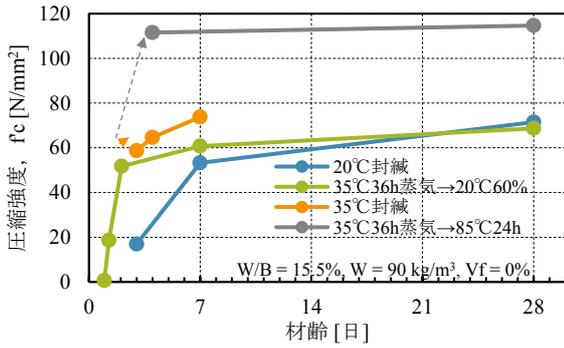


図-2 材齢と圧縮強度の関係

表-4 蒸気養生条件

記号	養生方法	
	一次養生	二次養生
A	35°C36h 蒸気 (昇温 15°C/h, 降温 7.5°C/h)	85°C24h 蒸気 (昇温 15°C/h, 降温 3°C/h)
B	20°C封緘	90°C48h 蒸気 (昇温 15°C/h, 降温 3°C/h)
C	85°C24h 蒸気 (昇温 15°C/h, 降温 3°C/h)	
D	90°C48h 蒸気 (昇温 15°C/h, 降温 3°C/h)	

(1) 力学特性

a) 圧縮強度

図-2 は短繊維を含まない基準配合を用いて給熱養生と強度発現性の関係を調べたものである。検討した養生条件は「20°C封緘」, 「35°C封緘」, 「35°C36h 蒸気養生→20°C60%RH 気中」, 「35°C36h 蒸気→85°C24h 蒸気」の4水準である。給熱養生はいずれも注水から約4時間後に昇温を開始し、昇温速度は15°C/h、降温速度は35°Cでは7.5°C/h、85°Cの場合は3°C/hとした。

実験の結果、20°C封緘では材齢2日でも脱型が出来ず、30~40 N/mm²を上回るのは材齢5日前後であった。35°Cの条件では、材齢1日から2日の間で急激に強度が発現し、材齢2日で50 N/mm²を上回る圧縮強度が得られた。材齢2日以降は強度発現が停滞し、20°C60%RH環境に置いた場合は材齢28日では20°C封緘と同程度となり、35°Cを継続した場合にも、材齢2日以降の圧縮強度の伸びは小さかった。一方、脱型後に85°C24hの蒸気養生を行なった場合には、短期間で100 N/mm²を超える高い圧縮強度が得られることが分かった。その後の圧縮強度の変化は小さく、UFC⁵⁾等の超高強度コンクリートと同様な挙動を示すことが分かった。

この結果を受けて、短繊維を用いた配合に対しては高温の蒸気養生を実施することを基本とし、一次養生の有無について検討を行なった。表-4に蒸気養生条件、表-5に検討を行なった配合と実施した養生条件の組合せを示す。高温の蒸気養生の条件は85°C24hと90°C48hの2

表-5 配合および実施した蒸気養生

W/B [%]	W [kg/m³]	Vg [m³/m³]	短繊維の種類	Vf [%]	養生条件
15.5	120	0.200	Fb15	1.00	B
12.0	100	0.200	Fb15	0.75	B
12.0	100	0.200	Fb15	1.00	A, B, C, D
12.0	100	0.200	Fb15	1.25	A

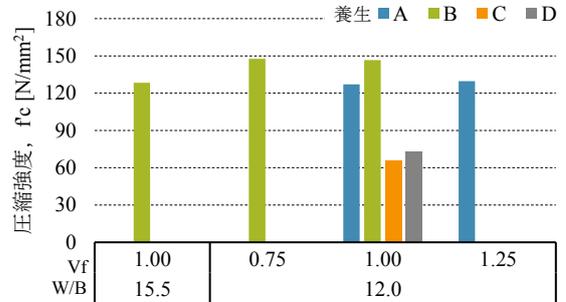


図-3 高温蒸気養生後の圧縮強度

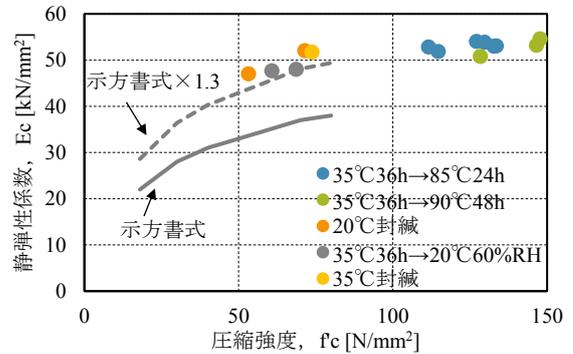


図-4 圧縮強度と静弾性係数の関係

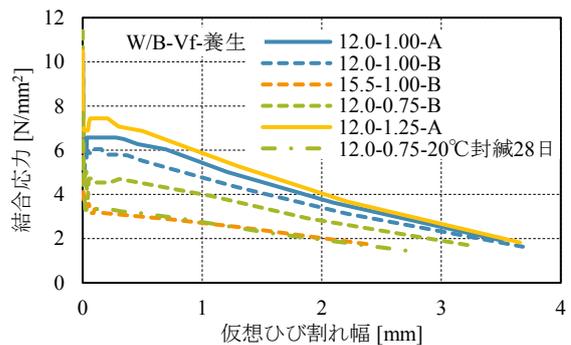


図-5 引張軟化特性

水準とした。いずれの養生方法でも、前置き時間として注水から4時間は封緘状態で20°Cの室内に存置した。養生A, Bでは前置き時間の後、一次養生として35°Cの蒸気養生を行なった。一次養生の終了後に脱型し、二次養生として高温の蒸気養生を行なった。それに対して養生C, Dでは、前置き時間の後脱型せずに高温の蒸気養生を行なうものである。図-3に養生終了後の圧縮強度の測定結果を示す。各種養生条件について検討した配合(W/B

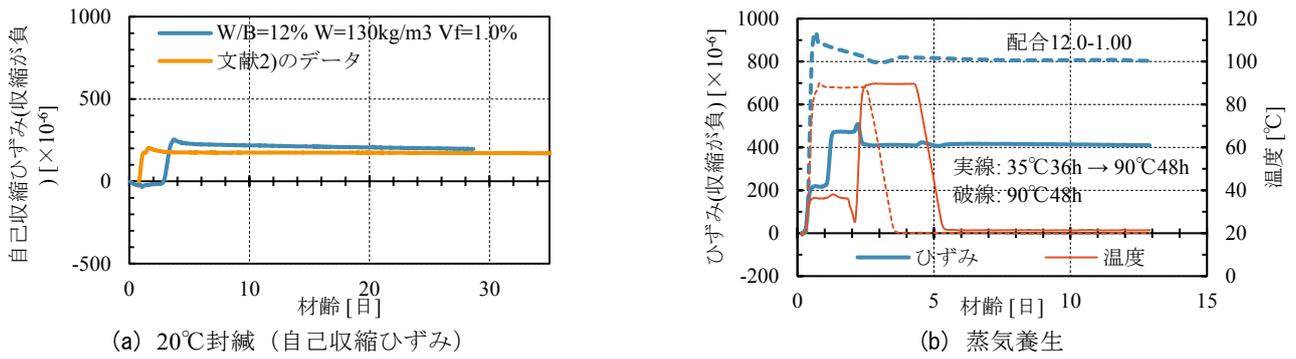


図-6 自由収縮ひずみ

(W/B=12.0%, W = 100 kg/m³, Vf = 1.00%) を見ると、前置き時間後すぐに高温の蒸気養生を行った場合には 100 N/mm² を超える高い圧縮強度は得られなかったことがわかる。ポルトランドセメントを用いない条件であっても、一次養生である程度の強度を発現させておかないと、高温養生の効果は得られないようである。一次養生を行った条件では、85°C24h より 90°C48h のほうが高い強度が得られ、その圧縮強度は 140 N/mm² を上回った。同じ養生条件で比較すると、圧縮強度に与える短繊維混入率の影響は小さいこと、W/B は基準配合と同様の 15.5% より、さらに低減した 12.0% のほうが高い圧縮強度が得られることが分かった。

b) 静弾性係数

図-2 および図-3 の圧縮強度の測定時に併せて測定した静弾性係数を圧縮強度との関係として図-4 に示す。図中には参考として、コンクリート標準示方書⁷⁾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ている。この図から、開発したコンクリートの静弾性係数は、一般のコンクリートに比べて高く、示方書式の 1.3 倍程度の値となることが分かる。圧縮強度と静弾性係数の関係に与える養生方法の影響はほとんどみられない。静弾性係数は配合要因のなかで骨材の影響を大きく受け、本コンクリートは FNS の特性により高い静弾性係数を示したものと考えられる⁸⁾。圧縮強度が高くなるに伴って静弾性係数の増加の程度は鈍化するが、おおよそ、示方書式の 1.3 倍が示す曲線の延長線上にある。

c) 引張軟化特性

短繊維補強コンクリートの最大の特徴はひび割れ発生後の力学特性であり、その特性は引張軟化特性により表される。図-3 で圧縮強度を調べた条件の一部では引張軟化特性の評価も行なった。引張軟化特性は JCI-S-002-2003 により求めた。図-5 に引張軟化特性を示す。比較として 20°C 封緘養生のデータの一例も併せて示す。このデータとの比較より、圧縮強度の大幅な増加によって

高い引張軟化特性を示すことが分かる。また、ポルトランドセメントを使用せず高温の蒸気養生を行うという特殊な条件であっても、短繊維混入率の増加に伴って高い引張軟化特性、すなわち短繊維が高い引張補強効果を発揮するという通常の短繊維補強コンクリートと同様の結果が得られている。

(2) 収縮ひずみ

基準配合のコンクリートは収縮量が非常に小さいことが特徴の一つである。そのため、単位ペースト量を増やして短繊維補強コンクリートとしたことや高温の蒸気による促進養生を行うことが収縮ひずみへ与える影響について確認した。図-6 に無拘束状態での自由収縮ひずみの測定結果を示す。図-6(a) は 20°C 封緘での収縮ひずみ (すなわち自己収縮ひずみ) であり、図-6(b) は二次養生として 90°C48h 蒸気養生を行う場合の一次養生の有無について比較したものである。図-6(a) には比較として、既報²⁾のデータのうち、本実験と近い条件のデータを示している。

図-6(a) より、20°C 封緘状態では、単位水量を増加させ、W/B を低減しても既報と同程度のひずみ量であることがわかる。すなわち、低収縮性という大きな特徴は損なわれていなかった。一方、同図からは、本実験の配合ではひずみの発生が遅れていることが見て取れる。W/B を低下させ高性能減水剤の使用量が増加している影響で凝結が遅くなっていることが示唆される。図-6(b) の破線に着目すると、前置き時間後すぐに高温養生を行うと、非常に大きい膨張ひずみが発生していることが分かる。一方、実線に着目すると、一次養生の途中 (材齢 24h 付近) から膨張ひずみが急増している。これは図-2 に示した 35°C 条件の強度発現と整合する結果である。すなわち、この材齢 24h 付近から膨張材の反応が活発となり、膨張が発生していると考えられる。なお、一次養生開始時点では凝結の始発には達していないと考えられるため、一次養生の昇温時の膨張ひずみは線膨張係

表-6 配合および強度試験結果

W/B [%]	W [kg/m ³]	Vg [m ³ /m ³]	短繊維の種類	Vf [vol.%]	圧縮強度 [N/mm ²]			静弾性係数 [kN/mm ²]		
					9 日	14 日	28 日	9 日	14 日	28 日
12.0	100	0.200	Fb15	1.00	156	155	157	54.4	52.6	55.0

数に変化しているために除去しきれなかった温度ひずみを含んでいる可能性がある。一方、前置き時間後すぐに高温養生を行った場合には、高温条件で膨張材が反応して異常な膨張を生じることで疎な組織が形成され、ひいては圧縮強度の停滞につながったと考えることが出来る。

二次養生の高温養生においては、従来の UFC ではここで大きな収縮ひずみを生じるが、本実験では 100×10⁻⁶程度の小さな収縮ひずみを発生するに留まっている。高温養生の終了後でひずみ変化が見られないのは、UFCと同様である。以上より、開発したコンクリートに対して、高温養生で高い圧縮強度を早期に発現させても、その低収縮性は損なわれないことが明らかとなった。

4. 実機製造および圧縮クリープ特性

前章までの結果を踏まえて、製品工場の実機ミキサによりコンクリートを製造した。実機ミキサは公称容量 2.75 m³の強制二軸ミキサであり、練り混ぜ量は 1.5 m³とした。養生方法は一次養生として注水より 4 時間後から 35℃36 時間の蒸気養生を行った。一次養生後、型枠の脱型を行ない二次養生として 90℃48 時間の蒸気養生を行った。蒸気養生における昇温速度、降温速度は前章と同様である。

表-6 にコンクリートの配合および強度試験結果を示す。実機製造においても室内と同様のコンクリートが得られた。図-7 に実機製造で採取した供試体を用いて JIS A 1157 に準じて実施した圧縮クリープ試験の結果（クリープ係数）を示す。載荷開始材齢は二次養生後の材齢 13 日である。一般のコンクリートと同様に時間の対数と線形関係となった。10,000 日まで外挿したクリープ係数は約 0.3 であり、UFC 指針⁵⁾に示される値と比べても同等以下という非常に小さい値であった。

5. まとめ

本稿では、結合材および細骨材に産業副産物を使用した超低収縮・超高強度繊維補強コンクリートについての検討を行なった。検討の範囲では、φ0.2×15 mm の鋼繊維を 1.0 vol.%使用する条件でも 100 kg/m³程度の単位水量で高い流動性を有すること、高温の蒸気養生により 1

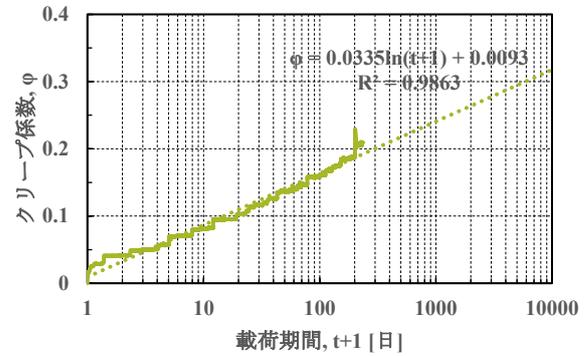


図-7 クリープ係数

週間程度で 150 N/mm²程度の圧縮強度を発現すること、このような条件でも収縮ひずみや圧縮クリープといった体積変化が相当に小さいことなどの知見を得た。

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) Sasaki, W., Ashizuka, K., Deguchi, M. & Taniguchi, H.: Development of High-strength Fiber Reinforced Concrete for Highly Durable Bridge Structures, Proceedings of the 3rd International Conference on Sustainable Construction Materials & Technologies, M4-8 5, 2013.
- 4) Ogata, T., Oshiro, T., Fukuda, M., Kasuga, A., Asai, H., & Nagamoto, N.: Development and Construction of Non-metal Bridge, Proceedings of the fib symposium 2016
- 5) 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
- 6) 佐々木亘，谷口秀明，樋口正典，宮川豊章：短繊維のかさ容積による高強度繊維補強コンクリートの流動性の評価，コンクリート工学年次論文集，Vol. 37, No. 1, pp. 307-312, 2015. 7
- 7) 土木学会：2017年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕，2018. 3
- 8) 松田拓，蓮尾孝一，野口貴文：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. 7