論文 鋼繊維で補強した無孔性コンクリート(PFC)の収縮ならびに クリープ

安田 瑛紀*1・小亀 大佑*1・落合 昂雄*1・河野 克哉*2

要旨:鋼繊維で補強した無孔性コンクリート(PFC)に対して,その体積変化特性を把握することを目的に, 収縮ひずみの測定およびクリープ試験を実施した。PFCの収縮ひずみは脱型以前の材齢初期から生じ始め, 特に蒸気養生中に生じるものが最も大きい。熱養生完了時点で PFC には 900×10⁻⁶ 程度の収縮ひずみが生じ, それ以降のひずみの増減は確認されなかった。圧縮強度 320N/mm² 程度の PFC に対して,強度の 1/3 に相当 する応力を1年間与えたところ,そのクリープ係数は 0.13 と,超高強度繊維補強コンクリート(UFC)と比 較してもきわめて小さい値となった。

キーワード: PFC, UFC, 繊維補強コンクリート, 超高強度コンクリート, 収縮, クリープ

1. はじめに

近年,流し込み成型で 400N/mm² 程度の超高強度を達 成する無孔性コンクリート(:Porosity Free Concrete,以下, PFC)が開発され¹⁾,利用が拡大しつつある。PFC は複数 成分の粉体を結合材として使用し,粉体粒子間の距離が 最小となる最密充填状態を満たすように構成材料の種類 および混合比を調整している。養生および製造において は,脱型直後に吸水処理を行うことで反応水を供給し, その後に2段階の熱養生を行い,供給水を利用した水和 反応にて強度発現を促進する。また,短繊維を混合する ことにより曲げ・引張強度および靱性が向上する²⁾等, その力学特性については多くが明らかになりつつある。

一方で、セメント系材料の実用化においては、その収縮やクリープによる体積変化を予め見込んでおくことが 重要となる。高強度コンクリートの収縮については、水 和反応により自己乾燥を引き起こすことで自己収縮が大 きくなる等、普通強度コンクリートとは異なる特性が知 られている。クリープについては、高強度コンクリート ではクリープ係数が小さくなることが知られており、例 えば圧縮強度 150N/mm² 程度の超高強度コンクリートに 対する検討³⁾や圧縮強度 200N/mm² 程度の超高強度繊維 補強コンクリート(:Ultra High Strength Fiber Reinforced Concrete、以下、UFC)に対する検討⁴⁾等がある。

PFC は上記のような従来の高強度コンクリートと同じ ような傾向を示すことが予想される一方で、その特徴的 な配合や製法が体積変化特性に影響するものとも考えら れる。そこで本報では、PFC の体積変化特性を把握する ことを目的に、鋼繊維を混合した PFC に対して収縮ひず みを測定するとともに、養生完了後の PFC に対して載荷 期間1年間のクリープ試験を実施したので、その結果に ついて報告する。

2. 試験内容

2.1 試験概要

コンクリートには PFC と UFC を用意し,いずれも鋼 繊維を混合した。試験では練混ぜ直後のフレッシュ性状, 硬化後の強度特性,収縮特性,クリープ特性をそれぞれ 検討した。UFC のクリープ試験結果については既報⁴かか ら引用する形とし,それ以外の項目は新たに UFC を作製 して試験した。本報では新たに作製した配合を UFC₁,ク リープ試験に供した既報⁴の配合を UFC₂ と記す。

2.2 材料および配合

使用した材料を表-1に、配合表を表-2に示す。PFC とUFC2の水結合材比は14%に統一し、水結合材比が同 ーの場合の諸性状を比較した。クリープ試験に供した UFC2⁴⁾はUFC1と単位水量が同一であるが、水結合材比 が異なる。また、UFC2では結合材と細骨材を予めプレミ ックスした状態で用いた。鋼繊維量はUFCでは体積に対 して内割で2%、PFCでは体積に対して外割で2%とした。 2.3 供試体作製方法

2.3 供試体作裂力法

練混ぜにはオムニミキサを使用した。練混ぜ後,材齢 48時間まで封緘養生(20℃)を行った。PFCにおいては, 脱型直後に脱気吸水処理(30分間)を行った。脱気吸水 処理はアクリル製密閉容器内で供試体を水中に浸漬させ, 容器に接続したポンプにて上層空気を排出して減圧する ことで実施した。さらにその後,最高温度90℃・最高温 度保持時間48時間の蒸気養生と,最高温度180℃・最高 温度保持時間48時間の加熱養生(1気圧)を連続して実 施した。また,熱養生による硬化特性への影響を検討す るため,脱気吸水処理後から気中養生(20℃, R.H.60%) に供した PFCも用意し,この場合の強度および収縮ひず みを測定した。UFC では脱型後に蒸気養生のみを行い, 吸水処理および加熱養生は実施していない。

*1 太平洋セメント(株) 中央研究所 第2研究部 高機能コンクリートチーム (工修) (正会員) *2 太平洋セメント(株) 中央研究所 第2研究部 高機能コンクリートチーム (工博) (正会員)

	我 · 医用物科						
種類	名称	記号	物性等				
練混ぜ水	水	W	上水道水				
PFC 結合材	プレミックス粉体	B ₁	PFC 専用プレミックス粉体				
UFC 結合材	プレミックス粉体	B ₂	市販の UFC 用標準粉体				
細骨材	珪砂	S	密度:2.61g/cm ³ ,最大寸法:0.3mm				
短繊維	鋼繊維	FM	φ0.20×15mm, 密度 7.84g/cm³, 引張強度 2800N/mm², 弾性率 200kN/mm²				
	PFC 用高性能減水剤	SP_1	ポリカルボン酸系				
混和剤	UFC 用高性能減水剤	SP ₂	ポリカルボン酸系				
	消泡剤	DF	ポリアルキレングリコール誘導体				

耒_1 庙田材料

表-2 配合表

ara (W/B	単位量(kg/m ³)								
HC.5.	(%)	W	B_1	B ₂	S	FM				
PFC	14	188	1343	-	934	157				
UFC1	14	180	-	1278	934	157				
UFC ₂ ⁴⁾	22	180	-	2254*		157				
NITO THE	+ ~ ++).4	(四)四,十十) 7	12-21.2		ナ.田い、	71.7				

*UFC2では結合材と細骨材にはプレミックス材を用いている

分類	項目	備考
	フロー	JIS R 5201 に準拠
フレッシュ	空気量	JIS A 1128 に準拠
	凝結時間	JIS A 1147 に準拠
	口炉改在	JISA1108に準拠し、 φ100×200
	广和短度	mm 供試体を使用
	HI H	JIS A 1149 に準拠し, 検長 60mm
	720	のひずみゲージにてひずみを測定
	休奴	し、圧縮強度と同時に測定
強度		UFC 指針案 ⁵⁾ に準拠し, $\phi 100 \times$
	ひび割れ	100mm 供試体を使用し, 検長 60
	発生強度	mm のひずみゲージにてひび割れ
		発生荷重を検知
	曲ば砕産	JISA1106に準拠し、40×40×160
	囲り短度	mm 供試体を使用

表-3 フレッシュおよび強度試験項目

2.4 試験方法

(1) フレッシュ性状および強度特性

フレッシュ性状および強度特性の試験項目を表-3 に 示す。各種の強度特性は養生のすべての工程が完了した 後に測定した。ただし、圧縮強度については養生工程の 各工程が完了した所定の材齢ごとに測定した。

(2) 収縮ひずみ,温度および線膨張係数

100×100×400mm 供試体の中心に標点距離 100mm,弾 性係数 40N/mm²のひずみ計および熱電対を埋設し,デー タロガーにてひずみおよび温度を収録した。収縮ひずみ 測定の概要を図-1 に示す。変形の拘束と水分の逸散を 防止する目的で,型枠内面全面にポリエステルフィルム を,端面にポリスチレンボードを設置した。これらは脱 型と同時に除去し,以降は供試体全面を曝露した。収縮 の測定は凝結の始発に達した時点から開始した。養生工 程が完了した以降も PFC および UFC₁を気中養生(20℃, R.H.60%) に供し,材齢 91 日まで測定を継続した。

収縮測定完了後の同供試体に対して,所定の温度サイ



図-2 クリープ試験の概要

クルを与え、この際の温度とひずみの関係から線膨張係 数を算出した。後述するように収縮測定完了時点でのひ ずみの増減はきわめて小さいことから、線膨張係数の測 定中に自己・乾燥収縮の発生は無いものと仮定し、発生 するひずみは全て熱ひずみとした。温度サイクルは JSCE-K561「コンクリート構造物用断面修復材の試験方 法(案)」に準拠し、20℃を起点に、10~60℃の範囲で(20℃ →60℃→10℃→60℃→20℃)、供試体内部で温度勾配が生 じないよう昇・降温速度 1.5℃/h で温度変化を与えた。試 験には環境試験装置を使用し、槽内湿度は R.H.60%に固 定した。線膨張係数の計算では得られた温度とひずみの 直線勾配(×10⁻⁶/℃)を 10℃毎に記録し、この平均値を線 膨張係数とした。

(3) クリープ試験

PFC のクリープ試験は、JIS A 1157 を参考に、載荷期 間を 1 年間として行った。クリープ試験の概要を図-2 に示す。クリープ試験では ϕ 100×200mm 供試体を使用 し、クリープ載荷を与える載荷供試体と、載荷を与えず 無載荷ひずみを測定する無載荷供試体をそれぞれ 3 本ず つ用意し、以下の式(1)によりクリープひずみ ε_{ct} を測定 し、式(2)によりクリープ係数 φ_{t} を算出した。

$$\varepsilon_{\rm ct} = \varepsilon_{at} - \varepsilon_e - \varepsilon_{st} \tag{1}$$

$$\varphi_{\rm t} = \varepsilon_{\rm ct} / \varepsilon_e \tag{2}$$

ここに, ε_{ct} : クリープひずみ, ε_{at} : 全ひずみ, ε_{e} : 載荷時弾性ひずみ, ε_{st} : 無載荷ひずみ, φ_{t} : クリー プ係数

ひずみは、供試体の表面に貼付したゲージプラグとコ ンタクトゲージを用いて測定した。ゲージプラグの貼付 位置は 100mm 間隔とし、対角線上の 2 点において測定 した。載荷供試体は試験装置の中心線上に 3 段重ねで設 置し、無載荷供試体はクリープ試験機および載荷供試体 と同試験室(温度 20℃, R.H.60%)内に静置した。また、 無載荷供試体の上下面はアルミテープにより封緘し、側 面のみを暴露することで載荷供試体と乾燥条件を揃えた。

載荷応力は圧縮強度の 1/3 に相当する応力を載荷し, 圧縮強度はクリープ載荷開始当日に測定した。クリープ 載荷中は荷重の増減が無いことを定期的に確認した。載 荷完了直後および所定の載荷期間において載荷供試体お よび無載荷供試体のひずみを測定した。また,1 年間の クリープ載荷完了後,除荷を行い,除荷完了後28日まで のひずみを適宜測定した。

UFC2 のクリープ試験の詳細については既報 ⁴⁾を参照 されたいが,試験環境や測定方法等は上述の方法と共通 している。載荷応力度は圧縮強度の42%としている。

3. 試験結果および考察

3.1 フレッシュ性状

フレッシュ性状試験結果を表-4 に示す。UFC₁では PFCよりも空気量が大きくなったが、これは消泡剤を使 用していないことに起因すると考えられる。PFCとUFC₁ の凝結時間の差は3時間25分であったが、これは高性 能減水剤の種類および添加量による影響が大きいと考え られる。

3.2 収縮特性

(1) 収縮ひずみおよび温度

PFCにおける熱養生完了時点までのひずみおよび温度の履歴を、図-3に示す。養生工程の進行とひずみおよび温度の関係を整理すると、まず脱型以前において硬化初期のひずみが発生し、この間の温度はほぼ一定値(20℃程度)であることから、水和発熱や外部環境による温度

表-4 フレッシュ性状試験結果

司스	SP	DF	フロー	空気量	始発時間
HC.D.	(B×%)	(B×%)	(mm)	(%)	(hh:mm)
PFC	2.5	0.2	257	2.1	19:15
UFC1	1.5	-	294	5.5	15:50

PFC では SP1, UFC1 では SP2を使用



への影響は小さい。これに対して、蒸気養生(最大温度 90℃)および加熱養生(最大温度 180℃)の昇温段階に おいてひずみの値が膨張側(正)に増加し、これは熱膨 張による影響が大きい。その後、最高温度保持区間にお いて、次第にひずみは収縮側(負)に増加し、これは温 度変化が無い状況でのひずみであるため、PFCの収縮ひ ずみによるものであると考えられる。降温段階において ひずみは収縮側(負)に急増し、これは冷却による熱収 縮の影響が大きいと考えられる。以上のように PFCにお いては、PFC 自身の水和反応および水分の逸散による自 己・乾燥収縮の影響に加えて、熱養生による熱膨張・収 縮の影響を受けてひずみの値が増減する。

次に、PFC および UFC1 における, 材齢 91 日までのひ ずみ発現履歴を図-4 に示す。熱膨張による影響を除外 するために, 熱養生を行った PFC および UFC1 では熱養 生中のひずみは省略し, 養生前後のひずみを記載してい る。PFC のひずみ履歴に注目すると,まず脱型以前にお いて 300×10⁻⁶程度のひずみが発生する。続いて蒸気養生 を行うことで収縮ひずみは増加し,890×10⁻⁶程度までひ ずみが増加する。その後,加熱養生を行うことによるひ ずみの増加はほとんど発生しない。さらにその後,気中 養生に供することによるひずみの増減はほとんどなく, 材齢 91 日までほぼ同値のひずみを維持した。これは, PFC が非常に緻密な硬化体を形成するため,水分の逸散 や浸入がほとんど生じないことに加え,加熱養生により PFC 中に残存する水分がほぼ消失しているために余剰の 水和反応や乾燥が生じないためであると考えられる。 UFC1においても同様に,蒸気養生完了後に気中養生に供 することで収縮ひずみが増減することはなかった。

一方,熱養生を行わず,脱気吸水処理後から気中養生 に供した PFC においては,材齢に伴い徐々にひずみが増 加し,材齢91日時点において 500×10⁻⁶程度のひずみが 発生した。これは,材齢と共に徐々に水和反応が進行し 自己収縮が発現すると同時に,水分の逸散による乾燥収 縮の影響と考えられる。

(2) 線膨張係数

収縮測定完了後の供試体を用いて測定した PFC および UFC1の線膨張係数を表-5 に示す。線膨張係数は PFC および UFC1でそれぞれ 15.2 および 15.9×10⁻⁶/Cとなった。表中に参考として記載しているが、土木学会の「超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針(案)」(以下,UFC 指針案)⁵では UFC の線膨張係数の参考値を 13.5×10⁻⁶/Cと規定しており、土木学会の「コンクリート 標準示方書」⁹ではポルトランドセメントを用いたコン クリートにおける参考値を 10×10⁻⁶/Cとしている。PFC や UFC では普通コンクリートよりも高い線膨張係数を 有するが、これは一般的にコンクリート中においては骨材よりもセメントペーストの線膨張係数が大きく、PFC や UFC のように骨材量の少ない配合ではセメントペーストによる影響が支配的になり、結果として線膨張係数 が大きくなるためと考えられる。

3.2 強度特性

PFC および UFC1 の圧縮強度発現の概要を図-5 に, 熱養生完了後の各種強度を表-6 に示す。PFC において 養生工程の進行に伴い圧縮強度は増加し,加熱養生後の 圧縮強度は 322N/mm² となった。加熱養生により収縮ひ ずみがほとんど増減しなかったことも考慮すると,加熱 養生による強度の増加は硬化体に表面張力を作用させて いた空隙中の水が消失することによる影響が大きく[¬], 水和反応の進行による影響は比較的小さいと考えられる。 蒸気養生後の圧縮強度は PFC で 256N/mm² であり, UFC1 よりも 14%程度高くなった。水結合材比が同一であって も, PFC の粉体構成は UFC よりも最密充填に近く緻密 な硬化体が形成されることや,吸水処理で供給した水分



表-6 熱養生完了後の強度特性

	圧縮強度 (N/mm²)	ヤング 係数 (kN/mm²)	ひび割れ 発生強度 (N/mm ²)	曲げ強度 (N/mm²)
PFC	322	59.2	10.3	44.1
UFC ₁	224	56.5	10.2	41.2

表-7	ク	IJ	-7	プ試験時	卵圧縮	強度お	よて	「載荷応力度
-----	---	----	----	------	-----	-----	----	--------

	圧縮強度f'。 (N/mm ²)	載荷応力度 σ (N/mm ²)	f',/σ	載荷力 (kN)
PFC	320	107	0.33	842
UFC ₂ ⁴⁾	238	100	0.42	785

を活用した水和反応が促進されたことなどが要因と推察 される。

熱養生を行わずに気中養生を行う場合,材齢に伴い強 度が徐々に増加する傾向となり,これは収縮ひずみの発 現とも対応する結果となった。その一方,収縮ひずみお よび強度は熱養生を行う場合よりも半分程度小さいこと から,PFC 結合材の水和反応が十分に発揮されるために は熱養生の実施が不可欠であるものと考えられる。

また,圧縮強度と比較するとその差は比較的小さいものの,ヤング係数,ひび割れ発生強度および曲げ強度のいずれも PFC の方が UFC₁ よりも高くなった。

3.4 クリープ特性

(1) クリープ試験結果

クリープ試験の載荷当日における PFC および UFC⁴) の強度試験結果とそれより決定した載荷応力度を,**表**-7 に示す。なお,試験の都合上クリープ試験の開始は PFC において材齢 28 日となったが,この間の圧縮強度の増 減はほとんど生じなかった。PFC と UFC² で載荷応力は 概ね同程度の約 100N/mm²となった。

PFC のクリープ試験におけるひずみの履歴を図-6 に, 試験結果の抜粋を表-8 に示す。PFC のクリープ試験に おいて,まず載荷により 1850×10⁻⁶の弾性ひずみが発生



図-6 PFC のクリープひずみ測定結果

表-8	PFC のひずみとクリープ係数の測定結果	(抜粋)
-----	----------------------	------

載荷期間(日)	0	1	3	7	28	56	91	182	364	除荷直後	除荷後+28
全ひずみ ɛ at (×10 ⁻⁶)	1850	1890	1923	1977	2000	2037	2047	2077	2107	200	170
無載荷ひずみ <i>ɛst</i> (×10 ⁻⁶)	0	0	15	22	12	8	3	12	13	13	10
載荷時弾性ひずみε _e (×10 ⁻⁶)	1850	1850	1850	1850	1850	1850	1850	1850	1850	1850	1850
クリープひずみε _{ct} (×10⁵)	0	40	58	105	138	178	193	215	243	-	-
クリープ係数 0 t	-	0.020	0.032	0.057	0.075	0.097	0.10	0.12	0.13	_	-



する。その後、載荷期間に伴い徐々にクリープひずみが 増加するもののその値は小さく、載荷終了の載荷期間 364日において243×10⁶であった。また、載荷期間中の 無載荷ひずみは非常に小さく、0~22×10⁶の範囲であり、 これはコンタクトゲージによる測定の誤差や試験室内の わずかな温度・湿度変化の影響の範囲内であるものと考 えられ、前述した収縮ひずみ測定結果の内容とも一致し ている。除荷により全ひずみは直ちに減少し、除荷直後 の全ひずみは200×10⁶であった。除荷後28日まで全ひ ずみの計測を継続したが、除荷後の全ひずみの回復はク リープひずみと同様に小さく、残留した全ひずみは除荷 後28日時点において170×10⁶に収束した。

次に、PFC と UFC2 におけるクリープ係数の比較を、
図-7 に示す。PFC のクリープ係数は UFC よりもさらに
小さく、材齢 364 日のクリープ係数は UFC2 では 0.33 で



図-8 クリープ試験前後の圧縮応カーひずみ関係

表-9 クリープ試験後の力学特性

	$f'_{c}(\text{N/mm}^2)$	$E_{c}(kN/mm^{2})$
クリープ前	320	59.1
クリープ後 (載荷供試体)	314	60.0
クリープ後 (無載荷供試体)	319	58.9

 f_{c} : 圧縮強度, E_{c} : ヤング係数

あったのに対して、PFC では 0.13 となった。グラフの形 状に着目すると、クリープ載荷開始から載荷期間 7 日程 度までの初期の勾配は両者で概ね同程度なのに対して、 PFC ではそれ以降のクリープ係数の増加が UFC2 よりも 明確に小さい。本検討ではクリープ試験を載荷期間 364 日で終了としたが、クリープひずみの増加は載荷期間 364 日時点でほぼ横ばいとなっていることから、以降の クリープ係数の増加もわずかであるものと予想される。

(2) クリープ試験後の圧縮強度特性

クリープ載荷を受けた PFC の力学特性を検討するこ とを目的に、クリープ試験後の載荷供試体および無載荷 供試体を用いて圧縮強度およびヤング係数を測定し,ク リープ載荷前(載荷当日に測定)の結果と比較した。圧 縮応カーひずみ関係の例を図-8に,試験結果を表-9に 示す。クリープ試験後の圧縮強度およびヤング係数はク リープ載荷の有無に関わらず,クリープ試験前とほぼ同 値となった。図-8からも明らかなように,圧縮応カー ひずみ関係にも変化は見られない。以上より,PFCは 107N/mm²の圧縮応力が1年間作用した後も,無載荷時 と変わらぬ圧縮特性を有していることを確認した。

(3) 考察

コンクリートがクリープを生じるメカニズムについて は種々の要因が提唱されているが、その1つにセメント 硬化体中の水分移動がある⁸⁾。すなわち,持続載荷応力 により主にゲル空隙中に存在する水が拡散・移動し、セ メントゲルの厚さが減少し、結果としてコンクリートの 変形が増大するというものである。この理論に基づいて 考えると、PFC は充填率の高い粉体結合材の使用や所定 の養生プロセスにより非常に緻密な硬化体組織を形成し ており、またその硬化体中に残存する水分は最高温度 180℃の加熱養生でほぼ消失しているものと考えられる。 コンクリートの火害に関する各種の検討⁹によれば, 200℃以上の高温であれば C-S-H や Ca(OH)2 等の水和物 の脱水和や分解が生じ、それ以下の温度においてはエト リンガイトの消失や自由水の蒸発が先行すると考えられ る。PFC の加熱養生においては、最高温度を 180℃にす ることで水和物の構造変化を抑えつつも自由水を蒸発さ せ,その結果として養生工程完了以降の収縮やクリープ 変形がきわめて小さかったものと考えられる。

他方,水分移動以外にクリープ変形を生じさせる駆動 力として,骨材周囲の遷移帯に発生するマイクロクラッ クの進展¹⁰⁾が考えられる。しかしながらPFCにおいては 図-8 に示したようにクリープ載荷により圧縮応カーひ ずみ関係はほとんど変形しておらず,硬化体中の構造に はほとんど変化がないものと推察される。また,著者ら の既往の検討¹¹⁾では鋼繊維で補強したPFCに対して圧 縮強度の85%に相当する高応力を計100サイクルまで繰 返し与えた後も,その応力ーひずみ関係に変化は認めら れないことを確認している。これらの結果から,持続荷 重や繰返し荷重によるマイクロクラックの進展はPFC においてごくわずかであることも,PFCのクリープ係数 が小さいことの要因であると考えられる。

4. まとめ

本検討で得られた知見を以下に示す。

 (1) 鋼繊維で補強した PFC において,養生中のひずみ は熱養生による熱膨張の影響を含みながら増減し, 熱養生完了後の PFC の収縮ひずみは 900×10⁻⁶程度 であり,特に蒸気養生中に生じるものが大きい。養 生工程完了以降のひずみの増減は確認されない。

- (2) PFC に熱養生を与えず気中養生に生じることにより徐々に強度は増加するものの、その強度および収縮ひずみは熱養生を実施した場合よりも小さく、+分な水和反応を得るには熱養生が不可欠である。
- (3) 圧縮強度の1/3に相当する応力を1年間持続的に与 えた場合のPFCのクリープ係数は0.13ときわめて 小さく、UFCの4割程度の値である。この理由とし ては、硬化体内部に余剰の水分がほとんど残存しな いことや遷移帯周囲のマイクロクラックの進展が わずかであること等が考えられる。

参考文献

- 河野克哉,中山莉沙,多田克彦,田中敏嗣:450N/mm² 以上の圧縮強度を発現するセメント系材料の製造 方法と硬化組織の変化,コンクリート工学年次論文 集,Vol.38,No.1, pp.1443-1448, 2016.6
- 2) 柳田龍平,中村拓郎,河野克哉,二羽淳一郎:圧縮 強度 400N/mm²の最密充填マトリクスを有する繊維 補強コンクリートの力学特性,コンクリート工学年 次論文集, Vol.38, No.1, pp.279-284, 2016.6
- 松田拓,河上浩司,西本好克:超高強度コンクリートのクリープ特性に関する実験的研究,コンクリート工学論文集,No. 19, Vol. 2, pp.11-19, 2008.5
- 4) 鵜澤正美:シリカ質系粉体の反応性を考慮した高流 動化超高強度繊維補強コンクリートに関する研究, 日本大学博士論文,2007.
- 5) 土木学会:コンクリートライブラリー113 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) 土木学会:2017 年度制定コンクリート標準示方書(設計編),2017
- 7) 堀素夫:表面エネルギーから見たセメント硬化体の 強さ,窯業協会誌, Vol.70, No.7, pp.54-59, 1962
- Z. P. Bazant : Thermodynamics of interacting continua with surfaces and creep analysis of concrete structmes. Nuclear Engineering and Design, Vol. 20, No. 2, 1972
- 9) たとえば, C. Alonso, L. Fernandez : Dehydration and rehydration process of cement paste exposed to high temperature environments, Journal of materials science, Vol. 39, pp. 3015-3024, 2004
- たとえば、日本建築学会:鉄筋コンクリート造建築 物の収縮ひび割れ-メカニズムと対策技術の現状
 -、日本建築学会、2003.5.
- 林佑希子,中村拓郎,安田瑛紀,二羽淳一郎:定応 力繰返し圧縮載荷を受けた PFC の圧縮特性,コンク リート工学年次論文集, No.409, Vol. 1, pp.429-434,