

論文 若材齢における高強度コンクリートの微視的構造が自己収縮拘束挙動におよぼす影響

森下隆志*1・五十嵐心一*2・川村満紀*3

要旨：若材齢の高強度コンクリートの研磨面の蛍光顕微鏡観察において見られる蛍光領域の特徴と自己収縮拘束特性との対応を検討した。密封養生を行った低水結合材比のコンクリートの内部組織は多孔質であり、特に骨材界面近傍はより多孔質であった。密封養生されたシリカフュームコンクリートでは、多数の未水和セメント粒子の界面に幅の狭い空隙の存在が確認され、この空隙は打設直後から十分な水分が供給されたコンクリートでは認められなかった。観察された蛍光領域は自己乾燥および自己収縮の拘束により生じた欠陥と考えられ、これら欠陥の形成がクリープ変形を増大させると考えられる。

キーワード：拘束収縮試験，自己収縮，クリープ，損傷，蛍光顕微鏡

1. 序論

低水セメント比のコンクリートでは材齢初期の活発な水和反応進行過程において著しく大きな自己収縮が生じる。この自己収縮が拘束されることにより発生する引張応力が、まだ強度発現の十分でない若材齢のコンクリートの強度よりも大きくなると、ひびわれの発生や破壊に至ることが指摘されている¹⁾。ひびわれの発生や内部引張応力の増大は、若材齢におけるコンクリート内部組織の形成に大きな影響を受けると考えられるが、若材齢の微視的構造の特徴と高強度コンクリートの拘束収縮特性と関連づけた研究はないようである。

本研究では、自己乾燥および自己収縮の拘束による内部組織の変化を明らかにするために、コンクリート研磨面の蛍光顕微鏡観察を行った。若材齢の高強度コンクリートにおいて観察された蛍光領域の特徴を、サーボ制御式一軸引張型拘束収縮試験装置により定量的に評価した引張クリープ特性と関連づけながら考察した。さらに、打設直後から十分に水分を供給する条件における自己収縮抑制効果およびシリカフューム

の混入が自己収縮におよぼす影響を蛍光顕微鏡観察およびセメントマトリックスの微小硬度測定結果と関連付けながら考察する。

2. 実験方法

2.1 使用材料

セメントは普通ポルトランドセメントを使用した。使用した骨材は石川県手取川産の川砂利および川砂であり、粗骨材の最大寸法は10mmである。使用したシリカフュームは市販の粉体品であり、その比表面積は20.0 m²/g、SiO₂含有量は90.8%である。水セメント比は0.25であり、シリカフュームの置換率は10%とした。ポリカルボン酸系の高性能AE減水剤を使用して、スランプ値が10±2cmになるようにした。以上の配合を表-1に示す。

2.2 一軸引張型拘束試験

練り混ぜたコンクリートを図-1に模式的に示した恒温室(18℃)内に置かれた拘束試験装置の型枠(供試体寸法:50×50×1018mm)に打設し、直ちに密封した²⁾。ただし、打設直後から水分を供給する場合(以下ポンディングと呼ぶ)には、

*1 金沢大学大学院 自然科学研究科 修(工) (正会員)

*2 金沢大学助教授 工学部土木建設工学科 博(工) (正会員)

*3 金沢大学教授 工学部土木建設工学科 工博 (正会員)

表-1 高強度コンクリートの配合 (kg/m³)

略語	W/B	水	セメント	シリカフューム	細骨材	粗骨材	高性能減水剤(%wt.B)
PC	0.25	145	581	0	559	1086	1.7
SF	0.25	142	510	57	559	1086	2.6

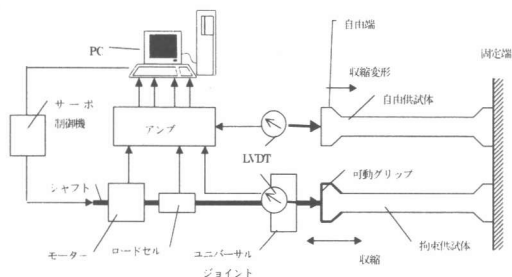


図-1 一軸引張型拘束収縮試験装置

供試体の表面を水分を含ませたスポンジで覆ってから密封した。十分な水を与えるために毎日スポンジに水を供給した。2本の供試体のうち、1本の供試体(非拘束供試体)は自由な収縮変形を許しその収縮量を自動計測した。一方、拘束供試体では拘束開始材齢を12時間とし、収縮ひずみが 10×10^{-6} に達するたびに、モーターの駆動により初期位置まで供試体を引き戻し、その過程でのグリッパの変位と拘束応力の変化を連続的に自動計測した。試験体数は3とし、非拘束供試体の収縮ひずみと拘束供試体の累積ひずみから、以下の式によりクリープひずみを求めた²⁾。

$$\varepsilon_c(\tau_k) = -\frac{1}{2} \sum_{i=0}^k [\varepsilon(\tau_i) - \varepsilon(\tau_{i-1})] - \varepsilon_{sh}(\tau_k) \quad (1)$$

$\varepsilon_c(\tau_k)$: 時間 τ_k におけるクリープひずみ

$\varepsilon_{sh}(\tau_k)$: 時間 τ_k における収縮ひずみ

$\varepsilon(\tau_i)$: 時間 τ_i における全ひずみ

2.3 強度試験

JSCE-F506に従って直径50mm、高さ100mmの円柱供試体を作成しただちに密封して、18℃の恒温室に静置した。材齢24時間にて脱型し、再び密封して18℃の恒温室にて密封養生を続けた。所定材齢にてJIS A 1113に従って割裂引張強度および圧縮強度試験を行った。またBS 1881に従って、一軸引張型拘束試験終了後の供試体の割裂引張強度を求めた。

2.4 蛍光顕微鏡観察

一軸引張型拘束収縮試験終了後の供試体から、厚さが約10mmの薄板を切り出した。切り出された薄板をエタノールに24時間浸漬して水分との置換を行った後、蛍光染料を含有したエポキシ樹脂を含浸させた。エポキシ樹脂の硬化後、耐水研磨紙を用いて表面を注意深く研磨して、蛍光顕微鏡用試料とした。

2.5 微小硬度測定

粗骨材の体積率が10%の供試体を作製し、一軸引張型拘束試験と同一条件で養生を行った。材齢7日にて厚さが約10mmの薄板を切り出し、耐水研磨紙を用いて表面を注意深く研磨し、ビッカース圧子によって骨材周囲の微小硬度を測定した。

3. 実験結果

3.1 自己収縮ひずみおよび拘束応力の変化

図-2は自己収縮ひずみの時間にもなう変化を示したものである。シリカフューム混入の有無による差はほとんど認められず、いずれのコンクリートも材齢24時間程度まで著しく増大し、その後の増大割合はそれ以前に比べて小さくなるが、ほぼ直線的に増大している。

図-3は拘束応力の時間にもなう変化を示したものである。材齢18時間以降シリカフューム無混入の方が高い値を示しており、拘束されている自己収縮ひずみが等しくても拘束力は大きく異なり、自己収縮ひずみの大きさだけで、発生応力は推定できないことがわかる。

3.2 クリープひずみの変化

図-4は拘束供試体にて拘束されているひずみ成分を分離して得られたクリープひずみを示したものである(式(1)参照)。シリカフューム混入の有無による差はほとんど認められない。図-2および図-4から明らかなように、いずれのコンクリートも自己収縮ひずみ同様にクリー

ブひずみは拘束開始直後の初期材齢にて著しい増加を示し、結果としてクリープひずみが拘束された全収縮ひずみの70%~80%を占めている。

若材齢にて載荷されると、シリカフェームコンクリートが大きなクリープひずみを生ずることが報告されている^{3,4)}。図-5に示すように、クリープひずみを拘束応力で除して得られる単位クリープひずみは、シリカフェーム混入の有無で大きく異なり、自己収縮ひずみおよびクリープひずみに差がないにもかかわらず、単位クリープひずみはシリカフェーム混入コンクリートの方が大きな値を示している。

一般的に、自己収縮は自己乾燥にともなう毛細管張力の発生によって説明されている。したがって自己収縮を抑制するためには、自己乾燥を防ぐことが1つの方法であり、その方法として水中浸漬が有効であると報告されている⁵⁾。図-6は、コンクリート打設後、直ちにポンディングされたコンクリートの自由収縮ひずみを示したものである。密封養生されたコンクリートとは対照的に、材齢24時間までに急激な膨脹を示し、その膨脹ひずみはシリカフェーム無混入コンクリートの方が大きな値を示している。しかしその後はいずれのコンクリートも若干の収縮傾向を示す。図-6から明らかなように、ポンディングが自己収縮および拘束引張応力の発生を抑制に有効であることが分かる。

3.3 コンクリートの蛍光顕微鏡観察

写真-1に一軸引張型拘束試験終了後のシリカフェーム無混入コンクリートの蛍光顕微鏡像を示す。拘束の有無にかかわらず、密封養生を行ったコンクリートのセメントマトリックスは全体として明るく、骨材粒子に沿ってbulkセメントマトリックスより明度の高い領域が観察された(写真-1(a), (b))。蛍光顕微鏡像に関しては、多孔質な領域に多量の蛍光染料含有樹脂が侵入することにより明度が増大するので、外部からの水の供給を受けなかったコンクリートにおいては、セメントマトリックス、特に骨材周囲に多孔質な領域が形成されたことを示してい

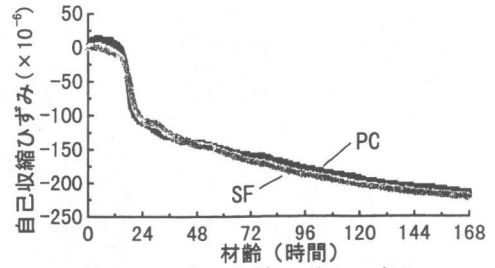


図-2 自己収縮ひずみの変化

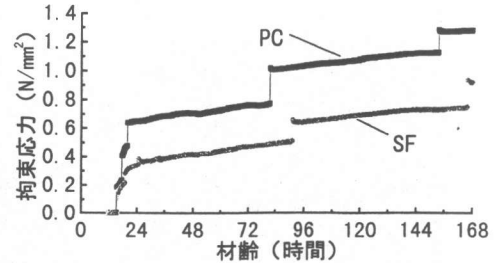


図-3 拘束応力の変化

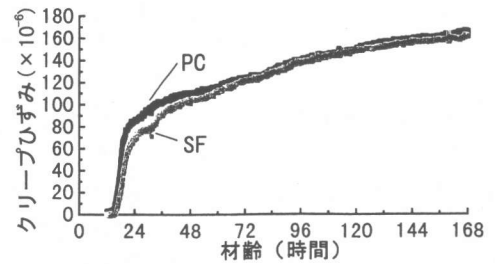


図-4 クリープひずみの変化

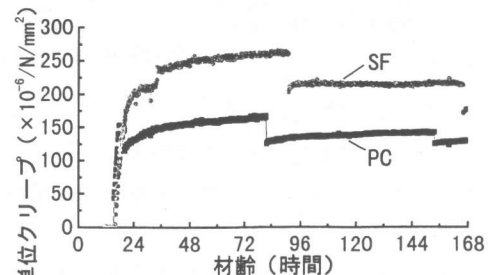


図-5 単位クリープひずみの変化

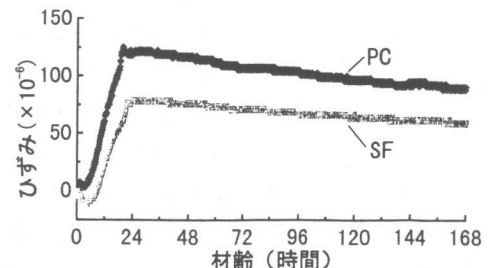


図-6 自由収縮ひずみの変化 (ポンディング)

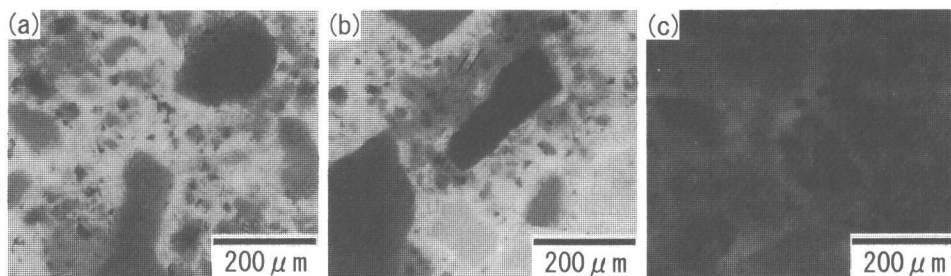


写真-1 シリカフェーム無混入コンクリートの蛍光顕微鏡像
(a)密封養生(非拘束供試体) (b)密封養生(拘束供試体) (c)ポンディング

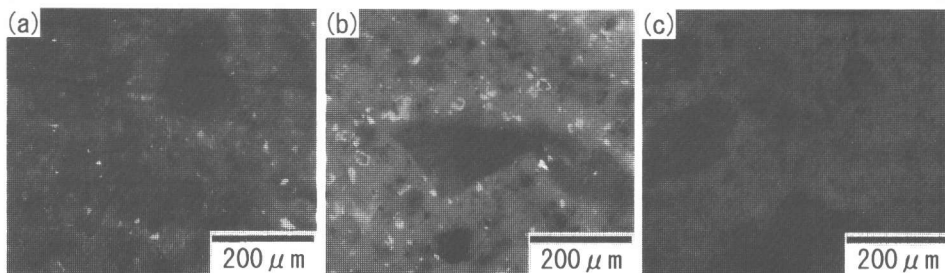


写真-2 シリカフェーム混入コンクリートの蛍光顕微鏡像
(a)密封養生(拘束供試体) (b)密封養生(拘束供試体, 長時間露出撮影) (c)ポンディング

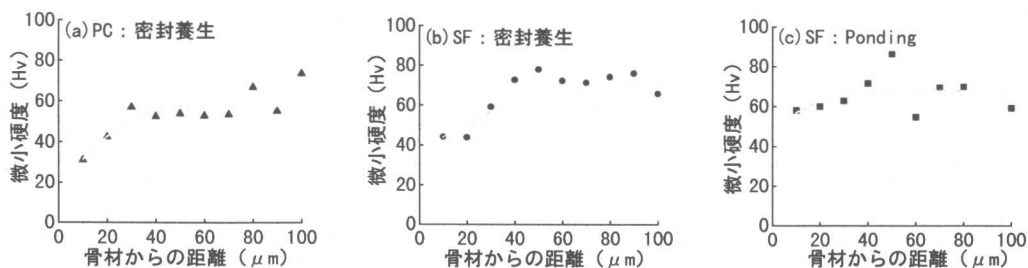


図-7 骨材界面付近の微小硬度の変化

る。これとは対照的に、ポンディングされたコンクリートのマトリックスは密封養生されたコンクリートより暗く、若材齢から緻密な組織が形成されたことがわかる。

写真-2 にシリカフェーム混入コンクリートの蛍光顕微鏡像を示す。シリカフェーム混入コンクリートは、無混入コンクリートに比べてマトリックスは暗く、緻密な細孔組織が形成されたことがわかる(写真 2-(a))。しかし、写真-2(b)に示すように、そのようなシリカフェームコンクリートでも、密封養生された場合には、骨材周囲は bulk セメントマトリックスより多孔質な領域であることがわかる。また、シリカフェームコンクリートにおいては、薄い蛍光領

域で縁取られた多数の未水和セメント粒子がマトリックス全体に分布しているのが特徴的である。しかし、写真-2(c)に示すように、材齢初期から十分に水が供給されると、未水和セメント粒子近傍の蛍光領域は観察されない。ポンディングされたコンクリートにおいて、骨材周囲の多孔質な領域が著しく減少し、また蛍光領域に縁取られた未水和セメント粒子が消失していることを考えると、低水結合材比のシリカフェームコンクリートにおける多孔質な領域の形成は、自己乾燥が原因であることが示唆される。

3.4 骨材周囲の微小硬度

図-7 に骨材からの距離に対する微小硬度の分布を示す。密封養生されたコンクリートの骨

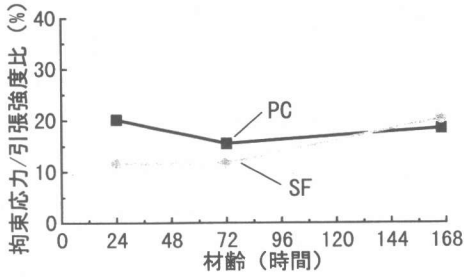


図-8 引張応力/引張強度の変化

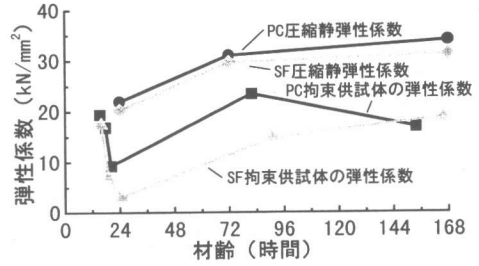


図-9 弾性係数の変化

材周囲は bulk セメントマトリックスより低い硬度を示しており、骨材周囲に弱い組織が形成されたことを示している。しかし、ポンディングされたコンクリートにおいては、骨材周囲の弱い領域は認められない。

4. 考察

4.1 自己乾燥および拘束応力による損傷

一般的に、自己収縮の拘束により引き起こされる内部応力が、コンクリートの引張強度より大きくなるとひび割れの発生や破断に至るといわれている。しかし、写真-1 に示したように、蛍光顕微鏡観察では明らかなひびわれは観察できなかった。また、本実験における引張応力/引張強度比は常に 20%以下であり(図-8)、ひびわれが発生すると考えられる値より低い。図-9 に拘束供試体の可動グリッスを引き戻す際の応力増分から求めた弾性係数と強度試験時に求めた静弾性係数の比較を示す。拘束供試体では材齢 24 時間前後に引張弾性係数の低下が認められるのが特徴的であり、その低下の原因については明らかではないが、その後は回復しており、材齢 168 時間ではシリカフェーム混入の有無による差は認められない。表-2 に試験終了後の供試体を用いて行った割裂引張強度試験結果を示す。拘束供試体は自由に収縮を許した供試体と比べてやや低い引張強度を示すに過ぎない。以上の結果より、シリカフェームコンクリートの拘束供試体においてもひびわれ発生の可能性は低いものと判断される。

一方、写真-1,2 に示したように、密封養生さ

表-2 割裂引張強度試験結果(N/mm²)

	非拘束供試体	拘束供試体
PC	4.99	4.24
SF	5.03	4.45

れたコンクリートはポンディングされたものに比べて多孔質な組織が形成されており、これは外部からの水分供給がなく、セメントの水和反応の進行が抑制されたためであると考えられる。一般的に、微小硬度の低下として現れるような骨材周囲の脆弱な層としては、遷移帯の存在が挙げられる。しかし、ポンディングされたコンクリートにおいてはその蛍光領域は認められず、さらに低水結合材比のシリカフェームコンクリートであることを考慮に入れると、骨材周囲の蛍光領域に対しては、遷移帯の形成以外の原因を考えるべきである。骨材周囲の蛍光領域は損傷もしくは欠陥の存在を示すと考えるならば、このような損傷は、骨材による自己収縮の拘束により発生したことが考えられる。

4.2 若材齢シリカフェームコンクリートのクリープ特性

一般に、完全に硬化したシリカフェーム混入高強度コンクリートは無混入のコンクリートよりクリープ変形が小さくなることが知られている。このようにシリカフェームコンクリートにおいてクリープ変形が小さくなるのは、高強度の発現と緻密な組織の形成によると考えられている。しかし、本研究においては、シリカフェームコンクリートの単位クリープは、無混入コンクリートより大きくなり、Bissonnette ら⁴⁾も報告しているように若材齢における引張荷重

下では、シリカフェームコンクリートは大きなクリープ変形を示すようである。

写真-2 から明らかなように、若材齢のシリカフェームセメントにおいては、幅の狭い蛍光領域によって縁取られた多数の未水和セメント粒子がセメントマトリックス全体に観察された。高倍率の電子顕微鏡観察によって、未水和セメント粒子と周囲のセメントマトリックスの間に狭い空隙が存在しており、その特徴は hollow shell hydration と極めてよく類似している⁶⁾。シリカフェームの混入によるポゾラン反応および水分が不足する条件下での水和の進行による化学的収縮が、セメント粒子の周囲における水和物の充填不足に関係していることが考えられる。未水和セメント粒子はセメントペーストマトリックス中の微小骨材として機能すると考えられ、周囲のマトリックスの変形を拘束する。しかし、セメントペーストマトリックスとの間に空隙を有すこれらのセメント粒子は、セメントペーストマトリックスの変形を拘束する効果は小さくなる。さらに、シリカフェームは材齢初期にて既にポゾラン反応を開始することやセメントの水和反応を促進することによって、材齢初期に既に多量の CSH ゲルが生成されることが考えられる。すなわち、低水結合材比においては、シリカフェームの存在によりクリープ変形の原因になる多量の CSH ゲルが生成され、同時に前述のように未水和セメント粒子や水酸化カルシウム結晶によるクリープを拘束する効果は減少する。よって、若材齢シリカフェームコンクリートにおける単位クリープひずみの増大は、低水結合材比のコンクリートにおける微視的構造の特徴によって説明できると考えられる。

5. 結論

- (1) 密封養生を行ったコンクリートは、十分な水分が供給されるコンクリートに比べて多孔質な組織を有する。
- (2) 打設直後からの水分の供給は、高強度コンクリートの自己収縮の抑制に効果的であり、

緻密な細孔構造が形成される。

- (3) 密封養生を行ったコンクリートにおいて、骨材による自己収縮の拘束により、骨材周囲に脆弱な層が形成される。
- (4) シリカフェームコンクリートにおいて、蛍光領域に縁取られた多数の未水和セメント粒子が認められた。
- (5) 若材齢シリカフェームコンクリートの大きなクリープ変形は、未水和セメント粒子周囲に形成される空隙に起因する拘束の低下によるものと考えられる。

参考文献

- 1) Paillere, A.M., Buil, M. and Serrano, J.J. : Effect of fiber addition on the autogenous shrinkage of silica fume concrete, *ACI Mat. J.* 86(2), pp.139-144, 1989
- 2) Kovler, K. : Testing system for determining the mechanical behavior of early-age concrete under restrained and free uniaxial shrinkage, *Materials and Structures*, 27(170), pp.324-330, 1994
- 3) Kovler, K., Igarashi, S. and Bentur, A. : Tensile creep behavior of high strength concretes at early ages, *Materials and Structures*, Vol.32, pp.383-387, 1999
- 4) Bissonnette, B. and Pigeon, M. : Tensile creep at early ages of ordinary, silica fume and fiber reinforced concretes, *Cem. Concr. Res.* 25(5) pp.1075-1085, 1995
- 5) Bentur, A., Igarashi, S. and Kovler, K. : Control of autogenous shrinkage stresses and cracking in high strength concrete, *Utilization of high strength / High performance concrete*, Proc. of 5th Intl. Symp., Sandefjord, pp.1017-1026, 1999
- 6) Diamond, S. : Aspects of concrete porosity revisited, *Cem. Concr. Res.* 29(8), pp.1181-1188, 1999