

# 論文 軽量骨材による内部養生が高強度コンクリートの内部組織形成に及ぼす影響

加藤 俊充<sup>\*1</sup>・五十嵐 心一<sup>\*2</sup>・川村 満紀<sup>\*3</sup>

**要旨**：含水状態の異なる軽量骨材を使用し、それらが低水セメント比の骨材-セメントペーストマトリックス界面領域の組織形成に及ぼす影響について、反射電子像の画像解析および微小硬度測定により検討した。飽水状態の軽量骨材を使用すると界面からの水分供給により界面には緻密な組織が形成される。また、乾燥状態の軽量骨材を使用すると、普通骨材界面で認められるような多孔質な組織が認められず、軽量骨材の低い弾性係数および放湿効果により、骨材周囲の収縮拘束によるセメントペースト組織の損傷が低減される。

**キーワード**：人工軽量骨材，内部養生，界面領域，画像解析，自己収縮

## 1. 序論

低水セメント比のコンクリートにおいて特徴的な現象である自己収縮を抑制する方法のひとつとして軽量骨材の使用が挙げられる。これは軽量骨材中の水分を相対湿度の低下したセメントペーストマトリックスに湿度勾配を利用して供給し、自己乾燥を抑制することを意図している。しかし、軽量骨材を多量に使用することにより強度は低下するため、軽量骨材の使用量を最適化することが必要であり、そのためにはコンクリート中における軽量骨材を効率的に分布させることが重要である。Bentzら<sup>1)</sup>は骨材の粒径および軽量骨材の置換率を変化させ、軽量骨材表面からのある距離内にあるセメントペーストの割合をシミュレーションにより評価しており、普通骨材に対する軽量骨材の置換率を増大させ、軽量細骨材を使用すれば水分供給範囲内(界面から 100–200  $\mu\text{m}$ )に全ペーストが含まれるようになることを示している。また、Luraら<sup>2)</sup>は実験的に軽量骨材からの水分供給距離を評価しており、その距離は約 1mm であり、この範囲内のセメントペーストで内部養生効果が得られているとしている。しかし、その一方にお

いて、軽量骨材の放水および吸水作用は骨材界面領域の水和反応の進行にも影響を及ぼし、その結果生成される界面領域の組織が、その後の放水作用に影響を及ぼすことも考えられる。したがって、軽量骨材の周囲の界面領域の組織の特徴を内部水分供給の観点から明らかにすることは重大な意義を有する。

本研究では、含水状態の異なる軽量骨材を低水セメント比のセメントペーストマトリックス中に埋め込み、骨材界面領域のセメントペースト組織形成の変化を反射電子像の画像解析および微小硬度測定により明らかにする。さらに、それぞれの骨材を使用した高強度コンクリートの自己収縮抑制効果と関連付けながら界面領域の組織形成が自己収縮抑制効果に及ぼす影響について検討する。

## 2. 実験方法

### 2.1 使用材料および配合

#### (1) 内部組織観察用供試体

セメントは普通ポルトランドセメントである。シリカフェームは市販の粉体品(比表面積:20.0  $\text{m}^2/\text{g}$ ,  $\text{SiO}_2$  含有量: 90.8%)であり、セメント質

\*1 金沢大学大学院 自然科学研究科環境基盤工学専攻 (正会員)

\*2 金沢大学 大学院自然科学研究科 助教授 博(工) (正会員)

\*3 金沢大学 工学部土木建設工学科 教授 工博 (正会員)

量に対する置換率を 10%とした。普通粗骨材は石川県手取川産川砂利(表乾密度:2.57g/cm<sup>3</sup>, 吸水率:2.73%), 軽量粗骨材は膨張頁岩系の人工軽量骨材(絶乾密度:1.27g/cm<sup>3</sup>, 30 分間吸水率:7.2%, 24 時間吸水率:10.36%)を粒径 5~10mm にふるい分けて使用した。飽水状態の軽量骨材を使用する場合は, 24 時間水中に浸漬してから使用した。また, 乾燥状態の軽量骨材を使用する場合には骨材の吸水を考慮する場合と考慮しない場合について検討を行った。軽量骨材の吸水を考慮する場合は, 30 分間吸水率に相当する水量を練り混ぜ水に加えた。乾燥状態の軽量骨材は初期含水状態によって吸水量および吸水速度が変化するので, その影響を避けるために, 使用前に 100°C の乾燥炉で 24 時間乾燥させた。セメントペーストの水結合材比は 0.25 とし, ポリカルボン酸系高性能減水剤を使用した。セメントペーストを 3 分間練り混ぜ, その後粗骨材(体積率 20%相当量)を混入して練り混ぜ, 直方供試体(寸法:40×40×35mm)を作製した。供試体は直ちに密封し, 7 日間 20°C の恒温室に静置した。

## (2) 自己収縮測定用コンクリート供試体

使用材料は内部組織形成用供試体のものに加えて, 石川県手取川産の川砂を使用した。軽量骨材(LWA)の置換率は, 普通粗骨材(NWA)に対して 25%, 39%および 100%とした。乾燥状態の軽量骨材を使用する場合は 30 分間吸水率に相当する水量を練り混ぜ水に加えて補正した。配合は表-1 に示すとおりである。

## 2.2 電子顕微鏡観察

材齢 7 日の供試体から試料を切り出し, エタノールに浸漬した。その後, 真空装置を用いて低粘性エポキシ樹脂を含浸させた。樹脂硬化後, 試料表面を耐水研磨紙およびダイヤモンドスラリーを用いて注意深く研磨した。電子顕微鏡を使用して任意の約 10 ヶ所において界面領域の反射電子像の観察を行った。

## 2.3 画像解析

界面領域の反射電子像に対して, 未水和セメ

表-1 コンクリートの配合

記号	単位量(kg/m <sup>3</sup> )						
	W	C	SF	S	G	LWA	SP(%)
PC-NWA	145	581	0	559	1086	0	1.7
PC-LWA-D	145	581	0	559	0	562*	1.4
PC-LWA	145	581	0	559	0	596	1.5
PC-LWA39	145	581	0	559	662	233	1.6
PC-LWA25	145	581	0	559	814	149	1.5
SF-NWA	142	510	57	559	1086	0	2.6
SF-LWA-D	142	510	57	559	0	562*	2.5
SF-LWA	142	510	57	559	0	596	2.5
SF-LWA39	142	510	57	559	662	233	2.8
SF-LWA25	142	510	57	559	814	149	2.7

SF: シリカフェーム NWA: 普通骨材 LWA: 軽量骨材

-D: 乾燥 SP: 高性能減水剤 記号末尾数字: 置換率

ントおよび毛細管空隙に関する 2 値化処理を行い, さらに, 界面から 100 μm までの領域を幅 10 μm ずつの帯状領域に分割した。各分割領域に対して, 未水和セメントおよび粗大毛細管空隙(直径が約 0.2 μm 以上)の体積率を求めた。

## 2.4 微小硬度測定

材齢 7 日の供試体から切り出した試料表面を, 耐水性研磨紙を用いて研磨した。その後, 骨材界面の任意の 5 ヶ所にて, 界面からの距離が 10 μm 間隔で 100 μm まで, ビッカース硬度(試験荷重 98.07mN)を求めた。

## 2.5 一軸引張型拘束収縮試験

練り混ぜたコンクリートを恒温室(18°C)内に置かれた拘束収縮試験装置の型枠(供試体寸法:50×50×1018mm)に打設し, 直ちに密封した。2 本のうち, 1 本の供試体(非拘束供試体)は自由な収縮変形を許し, 計測期間を 7 日間として, その収縮量を自動計測した。

## 2.6 軽量骨材粒子表面間距離の計測

飽水状態の軽量骨材の置換率を変化させた高強度コンクリートについて, 円柱供試体(φ 50×100mm)を作製し, 材齢 3 日で厚さ約 20mm の試料を 10 個切り出した。その後, 切断面をビニールで覆い, 軽量骨材を写し取った後, 画像解析により重心間距離を計測し, 平均粒径を 7.5mm として軽量骨材の粒子表面間距離を算出した。

### 3. 結果および考察

#### 3.1 反射電子像観察

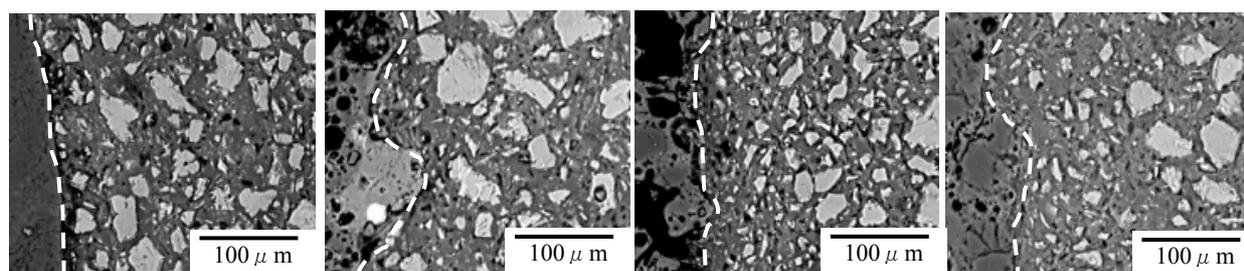
写真-1 はシリカフェーム無混入の場合における普通骨材および飽水状態および乾燥状態の軽量骨材-セメントペーストマトリックス界面領域の組織の反射電子像を示したものである(白破線：界面)。水セメント比 0.25 と低水セメント比であっても普通骨材を使用した場合は界面付近に一部空隙の多い領域が存在しているようである。乾燥状態の軽量骨材を使用した場合は水量補正の有無に関わらずほぼ同様な組織が形成されており、水量補正による骨材界面組織の差は明瞭でない。また、軽量骨材表面の凹凸部にはセメントペーストが進入しているが、一部には局所的に充填不足による領域が認められる。一方、飽水状態の軽量骨材を使用した場合は領域全体において未水和セメント粒子が少ないようであり、また界面近傍における空隙の多い領域も認められず、全体として緻密な組織が形成されていると考えられる。写真-2 は同様にシリカフェーム混入セメントペーストマトリックスの骨材界面領域の反射電子像を示したものである。いずれの場合においてもシリカフェーム無混入の場合に比べて、空隙の多い領

域は明らかに少なく、より緻密な界面が形成されている。

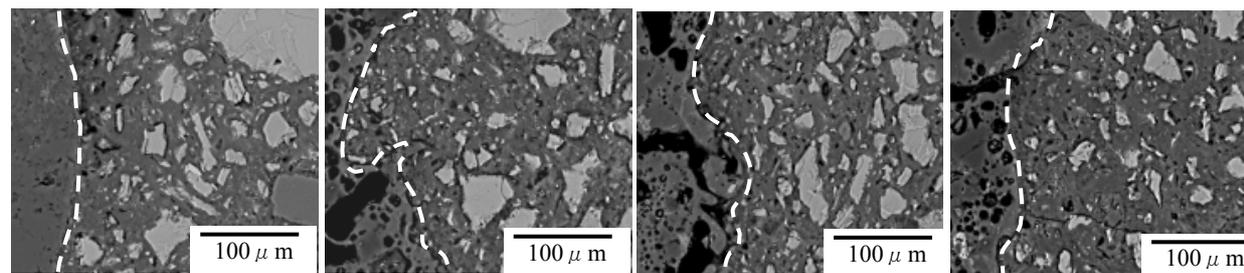
#### 3.2 画像解析

図-1 は骨材-セメントペーストマトリックス界面領域の未水和セメント率の、骨材表面からの距離にともなう変化を示したものである。10 $\mu$ m の帯状領域に分割して面積率を求めているため、界面から離れた領域(bulk セメントペーストマトリックス)よりも高い未水和セメント率を示すが、シリカフェーム無混入の場合(図-1 (a)), いずれの骨材を使用した場合においても界面に近づくにつれて未水和セメント率が低下しており、セメント粒子の充填不足の影響が現れているようである。飽水状態の軽量骨材を使用した場合、普通骨材を使用した場合より未水和セメント率が小さく、水和がより進行していると考えられるが、乾燥状態の軽量骨材を水量を補正せずに使用した場合は、未水和セメントの残存量がやや大きいようである。

図-2 は骨材-セメントペーストマトリックス界面領域の毛細管空隙率の界面からの距離にともなう変化を示したものである。普通骨材を使用した場合、界面近傍において空隙率が増大しており、多孔質な組織が形成されている。飽水



(a)普通骨材 (b)軽量骨材(乾燥-補正あり) (c)軽量骨材(乾燥-補正なし) (d)軽量骨材(飽水)  
写真-1 骨材-セメントペーストマトリックス界面領域(PC) (白色：セメント粒子，黒色：空隙)



(a)普通骨材 (b)軽量骨材(乾燥-補正あり) (c)軽量骨材(乾燥-補正なし) (d)軽量骨材(飽水)  
写真-2 骨材-セメントペーストマトリックス界面領域(SF) (白色：セメント粒子，黒色：空隙)

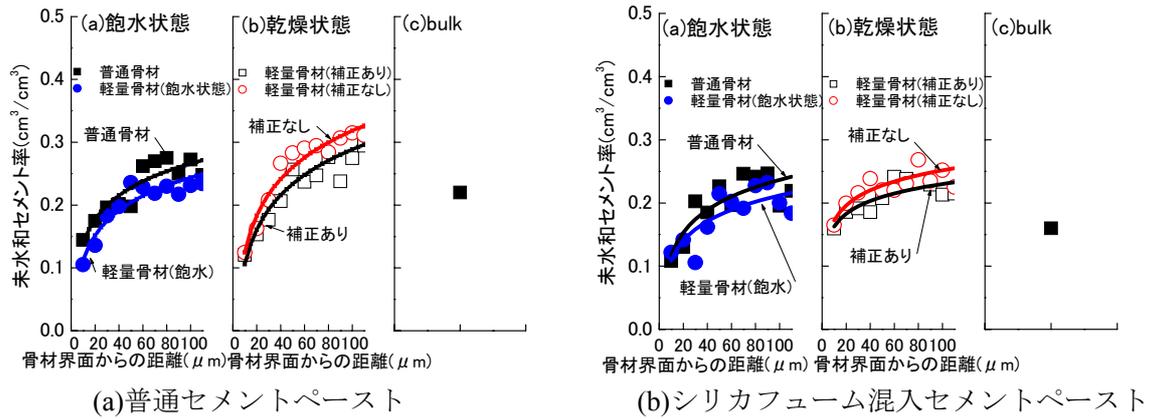


図-1 未水和セメント率

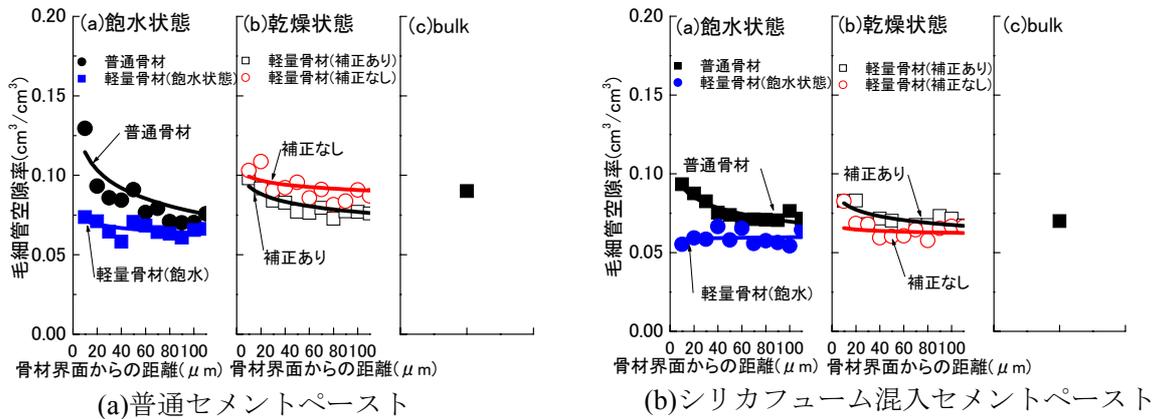


図-2 毛細管空隙率

状態の軽量骨材を使用した場合には、全体として空隙率が小さく、また界面近傍での空隙率の増大も認められない。これに対して、乾燥状態の軽量骨材を使用した場合は、空隙率は飽水状態の軽量骨材を使用した場合に比べて大きくなる。また、界面近傍において水量補正の有無による空隙率の大きな差は認められず、ほぼ同様な組織が形成されていると思われる。図-1 (a) および図-2 (a) より、乾燥状態の軽量骨材を使用すると未水和セメントが多くなり、また、空隙率も高くなる傾向が認められることから、飽水状態の軽量骨材の場合に比べるとセメントの水和の進行の程度は低いと考えられる。

シリカフェームを混入することにより(図-2 (b)), 界面領域全体の空隙率が小さく、また、界面からの距離にともなう空隙率の変化も小さくなる。図-1 (b) の未水和セメント率が普通セメントペーストの場合よりも小さいことを考慮すると、普通セメントペーストの場合よりも低

い空隙率はシリカフェームの混入によりセメントの水和反応が促進されて多くの CSH ゲルが生成されていたことを示唆している。また、普通セメントペーストおよびシリカフェーム混入セメントペーストのいずれの場合においても、界面からの距離 100  $\mu\text{m}$  程度で、bulk セメントペーストマトリックスとほぼ同様な空隙率を示し、軽量骨材を使用した場合においても、その含水状態に関わらず bulk セメントペーストマトリックスと異なる組織の特徴を有する領域は高々 100  $\mu\text{m}$  程度であると判断される。

### 3.3 微小硬度測定結果

図-3 に骨材-セメントペーストマトリックス界面領域の微小硬度測定結果を示す。図-3 (a) に示すように、普通骨材を使用した場合には界面に近づくにつれて硬度が低下しており、界面近傍において多孔質な組織が形成されていることを示している。飽水状態の軽量骨材を使用した場合には全体的に硬度が大きく、bulk セメ

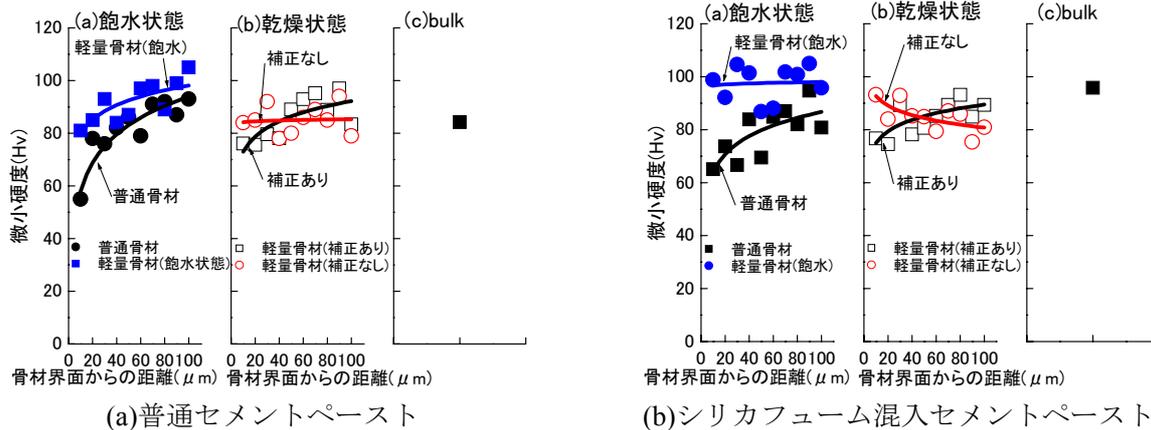


図-3 微小硬度測定結果

ントペーストマトリックスとほぼ同じ値を示し、界面近傍における硬度の低下はほとんど認められない。一方、乾燥状態の軽量骨材を使用した場合においても、普通骨材で認められるような界面近傍での微小硬度の著しい低下は認められなくなり、特に水量補正を行わない場合では硬度の低下は全く認められない。

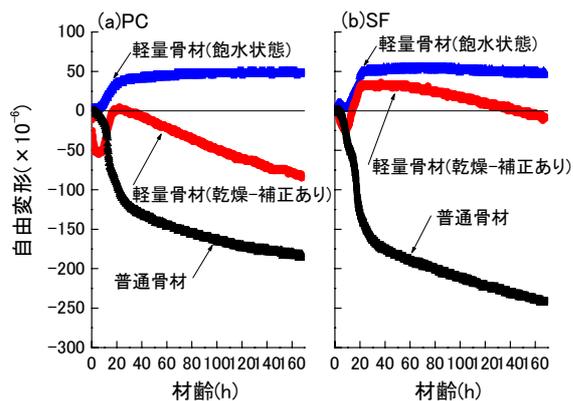
図-3 (b)に示すように、シリカフュームを混入すると界面における硬度の低下は小さくなり、飽水状態の軽量骨材では界面近傍においてもbulkセメントペーストマトリックスとほぼ同じ値を示し、また、乾燥状態の軽量骨材を水量補正を行わずに使用した場合は界面に近づくとつれて硬度は増大する傾向を示している。このことから、シリカフュームを混入することによって、軽量骨材界面に均質な組織が形成され、さらに、骨材粒子が周囲の水分を吸収することによって界面の強度が増大する傾向にあることがわかる。

図-1および図-2の界面領域の水和の進行に関する結果と、図-3の硬度分布をあわせて考察すると、軽量骨材を飽水状態で使用した場合と乾燥状態で使用した場合は界面の組織形成の特徴に相違があることがわかる。すなわち、軽量骨材を飽水状態で使用した場合は界面領域においては骨材からの水分供給により水和が進行し、空隙率が低減して硬度が増大する。これに対して、乾燥状態で使用した場合は水和の進行の程度は低いにも関わらず、界面近傍での硬

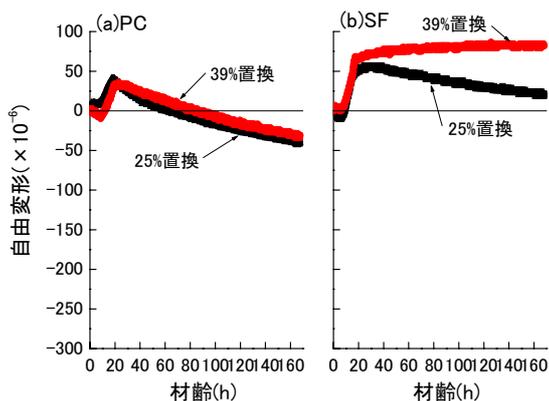
度の低下が抑制されている。これは、普通骨材の周囲ではセメントペーストマトリックスの収縮を拘束することによる微細なひび割れが発生しうるのに対して<sup>3)</sup>、軽量骨材の周囲では骨材自身の低い弾性係数により、そのひび割れ発生が緩和され、硬度の低下が緩和されたことが考えられる。

### 3.4 自由変形および水分供給範囲

図-4はそれぞれの骨材を高強度コンクリートの粗骨材として使用した場合における自由変形の経時変化を示す。飽水状態の軽量骨材を使用した場合では緩やかに膨張しており、軽量骨材からの水分供給による内部養生効果により自己収縮が抑制されている。一方、乾燥状態の軽量骨材の場合、材齢約20時間以降に収縮が認められる。この場合、収縮傾向はシリカフューム混入コンクリートの方が小さくなっている。一方、飽水状態の軽量骨材の置換率を変化させた場合(図-5)も、シリカフューム混入コンクリートで収縮量が小さくなっており、特に39%置換した場合において収縮が完全に抑制され、自己収縮抑制効果が得られている。表-2は、コンクリート中の軽量骨材粒子表面間距離の計算結果である。粒子表面間距離の1/2を軽量骨材からの水分到達距離とすると、完全に収縮が抑制された場合、全量置換で骨材表面から1mm程度、39%置換では5mm程度にわたって水分が供給されていたことになる。しかし、図-1~図-3に示したように、軽量骨材の保水およ



図一 4 軽量骨材の含水状態の相違による自由変形の変化



図一 5 軽量骨材置換率の相違による自由変形の変化

び吸水によると思われる組織変化が認められるのは高々 $100\mu\text{m}$ までの領域である。材齢1日程度で水セメント比0.25のセメントペーストの毛細管空隙構造の空隙径分布が不連続であることを考慮すると<sup>4)</sup>、主に水分移動は若材齢にて容易であると考えられるが、数mmにわたるような組織変化は認められない。したがって、自己収縮抑制を目的として水分供給距離を数mmと見込むことには注意が必要である。また、図一1および3より、低水セメント比であっても界面には空隙の多い領域が存在しており、界面領域の水分も自己乾燥の緩和に用いられることを考慮すると、練り混ぜ直後の界面領域内における水分の存在とその供給についても考慮する必要があると思われる<sup>5)</sup>。

#### 4. 結論

- (1) 軽量骨材を飽水状態で使用すると、水分供給により水和が進行し、界面領域に緻密な組織が形成され、シリカフェームの混入により、より均質な組織が形成される。
- (2) 軽量骨材を乾燥状態で使用すると、軽量骨材の低い弾性係数により、骨材周囲の組織の損傷が低減されるようである。
- (3) 飽水状態の軽量骨材を使用すると内部養生効果により自己収縮を抑制でき、軽量骨材の置換率およびシリカフェームの混入により自己収縮抑制効果が異なる。

表一 2 軽量骨材からの粒子表面間距離

置換率(%)	100%	39%	25%
粒子表面間距離(mm)	2.86	9.48	14.48

#### 参考文献

- 1) Bentz, D.P. and Snyder, K.A.: Protected paste volume in concrete, Extension to internal curing using saturated lightweight fine aggregate, Cement and Concrete Research, Vol.29, No.11, pp.1863-1867, 1999
- 2) Lura, P. and Breugel, K.V.: Volume changes of LWAC at early ages: the effect of particle size distribution of the LWA on experiments and numerical simulations, 9<sup>th</sup> International Conference on Durability of Building Materials and Components, Brisbane, Australia, pp.17-21, Mar.2002
- 3) Dela, B.F., and Stang, H.: Crack formation around aggregate in high-shrinkage cement paste, Fracture Mechanics of Concrete Structure, Proc. of FRAMCOS-3 (eds. Mihashi, H. and Rokugo, K.) AESIFICATIO, Freiburg, Vol.1, pp.233-242, Oct.1998
- 4) 五十嵐心一, 渡辺暁夫, 川村満紀: 反射電子像の画像解析によるセメントの水和度の推定と強度に関する一考察, コンクリート工学論文集, Vol.14, No.2, pp.23-29, 2003.8
- 5) Lura, P.: Autogenous Deformation and Internal Curing of Concrete, PhD. Thesis, Delft University of Technology, Apr.2003