

# 論文 暑中コンクリートに及ぼす人工軽量骨材の自己養生効果に関する一考察

当銘 葵<sup>\*1</sup>・小山 智幸<sup>\*2</sup>・肥後 康秀<sup>\*3</sup>・早川 隆之<sup>\*4</sup>

**要旨：**本研究は、暑中環境下で施工されるコンクリートに及ぼす人工軽量骨材の自己養生効果の有効性について検討したものである。人工軽量細骨材を普通コンクリートの細骨材の一部として置換したコンクリートを主な対象として暑中環境下で模擬部材を作製し、基本物性評価に加え、硬化体内部のセメントの水和反応性に着眼した各種アプローチを試みた。その結果、細骨材に人工軽量細骨材を 15～25%置換したコンクリートは、無養生条件下であっても強度及び耐透気性が向上し、セメントの水和反応の観点から自己養生効果の有効性が示された。

**キーワード：**暑中コンクリート、人工軽量骨材、自己養生、圧縮強度、透気性、水和度

## 1. はじめに

人工軽量骨材は、「軽くて強いコンクリート」の実現のために開発された骨材であり、現在でも建築・土木・二次製品などその用途は幅広い。一方、近年では、人工軽量骨材の持つ高い吸水性がコンクリートの乾燥収縮や自己収縮を抑制し、強度発現性や耐久性向上に寄与するとして、その自己養生効果に注目が集まっており、養生が困難な条件下での強度確保や暑中コンクリートの物性改善など、様々な研究結果が報告されている<sup>1)3)</sup>。特に、環境温度が 35℃を超える極暑中期に施工されるコンクリートでは、急激な水分の逸散によりワーカビリティの大幅な低下や強度、耐久性に悪影響を及ぼすため、養生シート等を用いて十分な養生を行わなければならない。それに対し、申らは人工軽量骨材の自己養生効果を活かすことで各種コンクリートの物性を改善できることを示しており<sup>4)</sup>、人工軽量細骨材を通常の細骨材の一部に置換することでも効果が発揮されることを確認している。しかし、この自己養生効果のメカニズムをセメントの水和反応の観点から十分に検証するには至っていない。

そこで、本研究では、人工軽量骨材の自己養生効果について、極暑中期に施工されるコンクリートを対象に模擬部材（柱・床）を作製し、その物性やセメントの水和反応性に着目し、アプローチを試みた。普通コンクリートを比較対象とし、普通コンクリートに人工軽量細骨材を細骨材体積比の 15%および 25%を置換したものおよび軽量コンクリート 1 種について強度特性および透気性状を中心とした評価を行った。また、硬化体マトリクスの水和形態等にも着目し、細孔径分布や水酸化カルシウム生成量ならびに反射電子像を用いた画像解析から算出

した水和度との関連性について評価した。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料

本実験における使用材料の一覧を表-1 に示す。セメントは普通ポルトランドセメント（密度 3.15g/cm<sup>3</sup>）を、人工軽量骨材は膨張頁岩を原材料として製造されたものであり、人工軽量粗骨材（表乾密度 1.67g/cm<sup>3</sup>、吸水率 31.4%）、人工軽量細骨材（表乾密度 1.90g/cm<sup>3</sup>、吸水率 15.2%）ともに 24 時間水に浸漬したプレウェッティング状態のものを用いた。また、AE 減水剤は、いずれの調査においても暑中期用として遅延形を使用した。

### 2.2 コンクリートの調査および試験体

コンクリートの調査を表-2 に示す。調査は、呼び強度 27、スランプ 18cm、粗骨材最大寸法 20mm の普通コンクリート（普通）を基準とし、人工軽量細骨材を細骨材の体積比で 15%（SL15）および 25%（SL25）を置換したもの、さらに普通と同じ呼び強度 27 の軽量コンクリート 1 種（軽量 1 種）の計 4 種類とした。試験体であ

表-1 使用材料

種類	記号	品名および物性
セメント	C	普通ポルトランドセメント(密度 3.15g/cm <sup>3</sup> )
細骨材	S	玄界灘産海砂(表乾密度 2.57g/cm <sup>3</sup> , 吸水率 1.80%)
	SL	人工軽量細骨材(表乾密度 1.90g/cm <sup>3</sup> , 吸水率 15.2%)
粗骨材	G	古賀市谷山産砕石(表乾密度 2.72g/cm <sup>3</sup> , 吸水率 0.71%)
	GL	人工軽量粗骨材(表乾密度 1.67g/cm <sup>3</sup> , 吸水率 31.4%)
混和剤	AD	AE 減水剤(遅延形)リグニンスルホン酸塩ポリカルボン酸系
	AE	AE 剤 アルキルエーテル系

\*1 太平洋セメント（株）中央研究所 第 2 研究部建設マテリアルチーム 工修（正会員）

\*2 九州大学 大学院人間環境学研究院 都市・建築学部門准教授 工博（正会員）

\*3 人工軽量骨材協会

\*4 太平洋セメント（株）中央研究所 第 2 研究部建設マテリアルチーム主任研究員 工修（正会員）

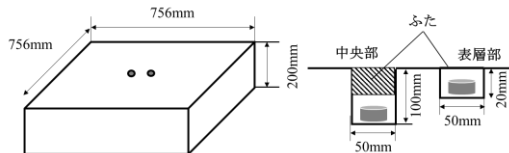
表－2 コンクリートの調合

調合名	W/C (%)	s/a (%)	空気量 (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )						AD (C×%)	AE (C×%)	単位容積質量(kg/m <sup>3</sup> )
				W	C	S	SL	G	GL			
普通	53	46.4	4.5	184	348	789	—	963	—	1.1	0.0042	2,284
SL15				184	348	671	87	963	—	1.1	0.0042	2,253
SL25				184	348	591	146	963	—	1.1	0.0042	2,180
軽量1種	47	47.1	5.0	178	379	789	—	—	576	1.1	0.0042	1,922

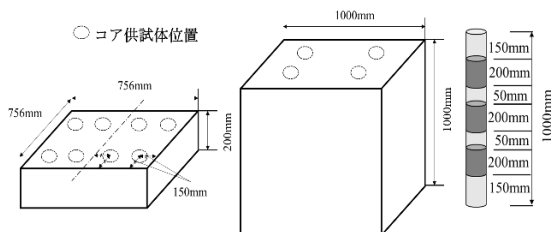
表－3 試験項目および方法

項 目		規格など
フレッシュ コンクリート	スランプ	JIS A 1101
	空気量（圧力法）	JIS A 1116
	コンクリート温度	JIS A 1156
硬化 コンクリート	床試験体の温湿度	超小型温湿度 センサ
	圧縮強度 (材齢 7、28、91 日)	JIS A 1107 JIS A 1108
	透気性状試験	トレント法
水和水（反射電子像による）		画像解析
水酸化カルシウム生成量		TG-DTA
細孔径分布		水銀圧入式 ポロシメータ

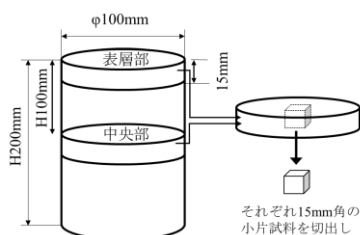
● 温湿度センサ位置



図－1 温湿度センサ位置



図－2 床・柱試験体のコア抜き位置



図－3 床コア試験体の概要

る模擬部材は、1m 角の柱試験体および、幅 756×奥行 756×厚さ 200 mm の床試験体とした。

### 2.3 コンクリートの製造および養生条件

コンクリートは、生コンクリート工場のプラントで製造した。1 バッチあたり 2m<sup>3</sup> として練混ぜ、バッチごとにフレッシュコンクリート性状を確認し、管理目標範囲内となるように骨材の表面水率および混和剤量を調整した。練り混ぜたコンクリートは、60 分の運搬を想定し、アジテータ車内で 60 分間待機させ品質管理試験を行った後に打込みを行った。コンクリートの打込みおよび各試験体の養生は雨のかからない屋内で行った。屋内の環境温度は平均約 35℃(最大 39.5℃)、湿度は平均約 54%RH であった。打込みでは、棒形振動機と型枠面を木槌で叩き締め固めた。柱試験体は、打込み後直ぐに上面を均し、発泡スチロールを被せて上下を断熱状態とし、材齢 7 日まで型枠内に存置した。床試験体は、打込み直後に一次仕上げを行い、ブリーディング終了後、金コテを用いて平滑に仕上げた。

床試験体の養生は、それぞれの調合で無養生およびシート養生の 2 種類を採用した。シート養生はポリ塩化ビニル製のシートを用い、ブリーディング水が消失した直後から 5 日間、型枠上面を覆うことで行った。

### 2.4 試験項目および方法

#### 2.4.1 フレッシュコンクリート

試験項目および方法を表－3 に示す。フレッシュコンクリートの品質試験として、練り混ぜ 60 分後に打込み前のコンクリートのスランプ、空気量、温度を測定した。

#### 2.4.2 硬化コンクリート

##### (1) 床試験体上部および中心部の温湿度

無養生とした床試験体の表層部（上面より深さ約 20mm）および中央部（上面より深さ約 100mm）に直径 50mm の円柱状の空間を打込み時に設け、硬化後に小型センサを空間底部に設置し温湿度を測定した。中央部の空間は、表層部と同じ容積（直径 50mm×高さ 20mm）となるようにポリプロピレン製素材のふたを埋め込み、隙間はシーリング材で密閉した。表層部は同じ素材の薄片のふたで上部を覆い密閉した。設置方法および位置を、図－1 に示す。測定は普通と SL25 についてのみ行った。

##### (2) 圧縮強度

コンクリートの圧縮強度は、柱および床試験体から抜いたコア供試体を試験に供した。コア採取位置を図-2に示す。柱試験体は材齢ごとに1本ずつコアを採取し、図-2に示すように切断した3本を圧縮強度試験に供した。床試験体は、試験体の中央から左右に分けて、圧縮強度試験用3本と分析用1本を材齢ごとに採取した。

### (3) 透気性状

床試験体では、床表面の12箇所ドレント試験によりコンクリートの透気性状を評価した(材齢91日)。ドレント透気試験は、コンクリート表面を二重チャンバーで密閉空間を作り、その内部チャンバーの気圧変化から透気係数を算出する方法により行った。

### 2.4.3 細孔径分布

細孔径分布では、床試験体から抜き取ったφ100×200mmのコア供試体を用いて試料調製を行った。所定材齢において各調合の供試体から打設表層部と中央部をそれぞれ厚さ15mmにダイヤモンドカッターで切断し、アセトンに浸漬して水和停止を行った。その後、11%RHの乾燥装置にて一週間乾燥を行い、モルタル部分を5mm角程度となるよう切断し、測定範囲が細孔半径3nm~10μmの水銀圧入式ポロシメータで細孔容積ならびに分布を測定した。

### 2.4.4 水酸化カルシウム生成量

細孔径分布の測定と同じ調製試料を用い、粗骨材を取り除いたモルタル部分をめのう乳鉢にて粉碎した。TG-DTAにより毎分10℃で20℃から1000℃に加熱し、600℃までの強熱減量を求めた。脱炭酸の影響を排除するために、試料の減量の測定温度は600℃とした。また、450℃前後での水酸化カルシウム(CH)の脱水率から、CH生成量 $V_{CH}$ を以下の式より算出した<sup>5)</sup>。

$$V_{CH} = \frac{m'}{(100-m)} \times 100 \quad (1)$$

$V_{CH}$ : 水酸化カルシウム生成量(%)

$m'$ : 450℃前後での水酸化カルシウム脱水率(%)

$m$ : 600℃までの試料の減量(%)

### 2.4.5 反射電子像による画像解析

細孔径分布およびCH生成量の測定に用いた表層部と中央部の試料の中心部分から、一辺15mm角の小片試料を切断し(図-3)、エポキシ樹脂で含浸硬化させた後、観察面を研磨し、炭素による蒸着を施して反射電子像観察用試料とした。加速電圧15.0kV、観察倍率200倍および500倍で小片試料の研磨面を撮影した。観察には、反射電子(BSE)検出器を付属した電界放出形走査電子顕微鏡(SEM:日本電子㈱ JSM-7001F, BSE:日本電子㈱ SM-54060RBEI)を用いた。

また、観察倍率500倍の粗骨材を含まないモルタル部分に対して約10箇所の画像を取り込み、2値化処理を行

い、1画像に含まれる未水和セメントの面積率を求めた。ステレオロジーの法則に基づき、面積率は体積率に等しいとし、セメントペースト部分の水和度 $\alpha_{BEI}$ を以下の式により求めた<sup>6)</sup>。10箇所の画像それぞれの水和度 $\alpha_{BEI}$ の平均を代表値とした。

$$\alpha_{BEI} = 1 - \frac{V_{unh}}{V_{init}} \quad (2)$$

$\alpha_{BEI}$ : セメントペーストの水和度

$V_{unh}$ : 未水和セメント体積率( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ )

$V_{init}$ : 調合上のセメント体積率( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ )

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 フレッシュコンクリート

打設前のフレッシュコンクリートの試験結果を表-4に示す。細骨材に人工軽量細骨材を置換したSL15, SL25の単位水量およびAE減水剤添加率は普通といずれも同一であるが、SL25のスランブは普通よりも1.0cm大きい値を示した。また、調合②~④の空気量は、それぞれ骨材修正係数②0.2%, ③0.3%, ④0.8%を差し引いた値を示している。

### 3.2 床試験体内部の湿度

普通およびSL25における無養生の床試験体の表層部および中心部の材齢30日までの相対湿度の履歴を図-4に示す。SL25と普通では表層部の湿度に明確な違いが認められ、打込み直後から材齢91日までの平均相対湿度が、SL25は94.6%, 普通は90.9%であった。また、普通は材齢15日程度から徐々に湿度の低下が認められるが、SL25の湿度低下は緩やかであり材齢25日程度まで95%に近い値を維持していた。また、中心部の湿度はい

表-4 フレッシュコンクリート試験結果

調合名	スランブ <sup>°</sup> (cm)	空気量 (%)	コンクリート 温度(℃)	外気 温度(℃)
①普通	17.5	3.6	34.0	36.0
②SL15	18.0	3.0	34.0	37.0
③SL25	18.5	2.7	35.0	37.5
③軽量1種	18.5	6.3	35.0	35.0

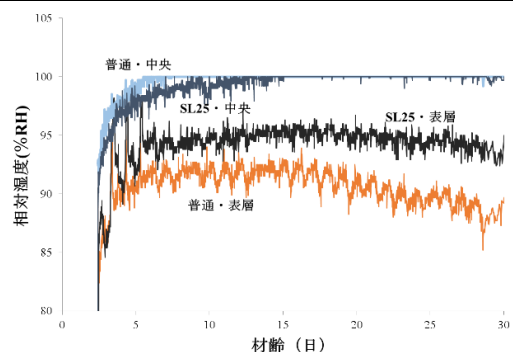


図-4 無養生の床試験体表層部の相対湿度履歴

ずれも材齢 10 日程で 100%に近い値となり、材齢 91 日後も同等の値であった。これらのことから、極暑中期の過酷な条件下であっても、軽量細骨材を適量混入することで部材表層部の保湿性を高める効果が期待できる。

### 3.3 圧縮強度

柱および床試験体から採取したコア供試体の圧縮強度試験結果を図-5 に、床試験体における人工軽量細骨材置換率と圧縮強度(材齢 91 日)の関係を図-6 に示す(前年度の実験結果も併記)。材齢 91 日における柱試験体のコア供試体の圧縮強度比は、普通に対し SL15 が 1.27, SL25 が 1.21 であった。床試験体では、前年度の実験結果ほど明確ではないが、人工軽量細骨材を置換することで普通よりも良好な強度発現を示す傾向が認められた。

### 3.4 透気性状

床試験体を対象としたトレント透気試験の結果を図-7 に示す(前年度の実験結果も併記)。前年度と同様に人工軽量細骨材の置換率の増大に伴い透気係数はやや小さくなる傾向を示した。これは、人工軽量細骨材の自己養生効果によってセメントの水和が進行しコンクリートの組織が緻密化した影響と考えられる。また、シート養生では無養生と比較し、透気係数が大幅に低下しているが、これは自己養生の効果に加えて、材齢初期の表層部の含水比の違いが大きく影響したものと考えられる。

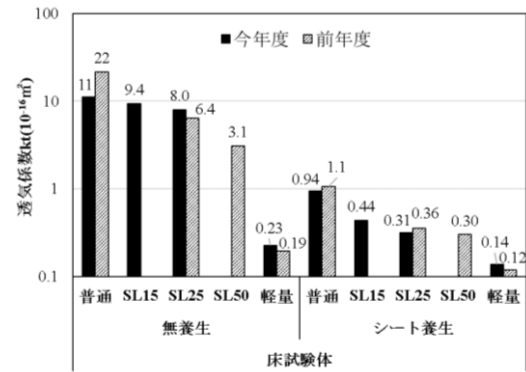


図-7 透気性状

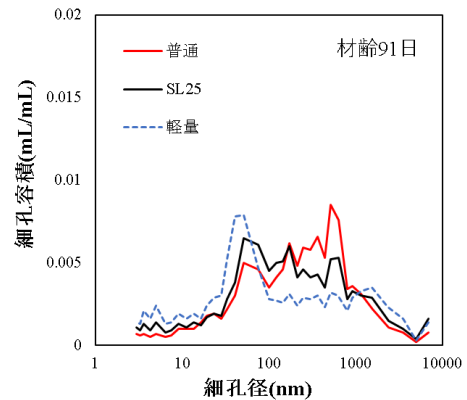


図-8 表層部の細孔径分布(無養生)

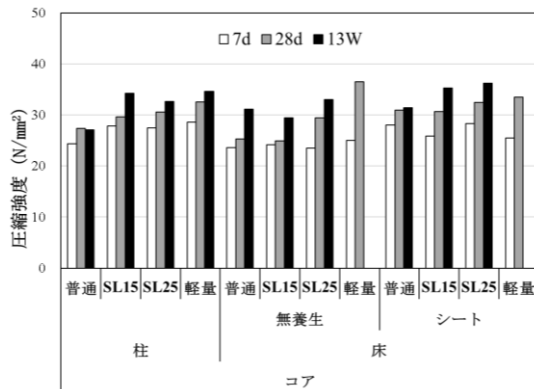


図-5 各試験体から採取したコア供試体の圧縮強度

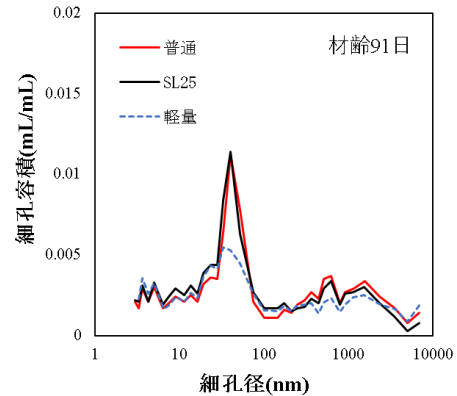


図-9 中央部の細孔径分布(無養生)

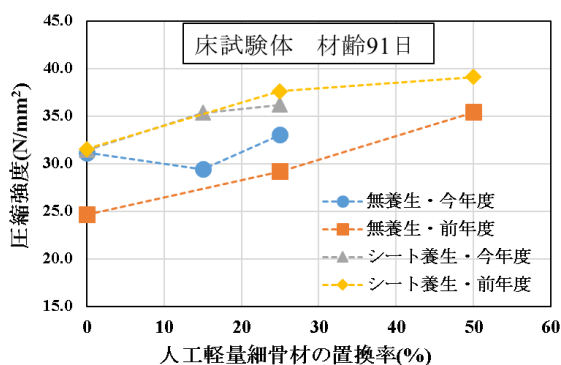


図-6 人工軽量細骨材置換率と圧縮強度の関係 (前年)

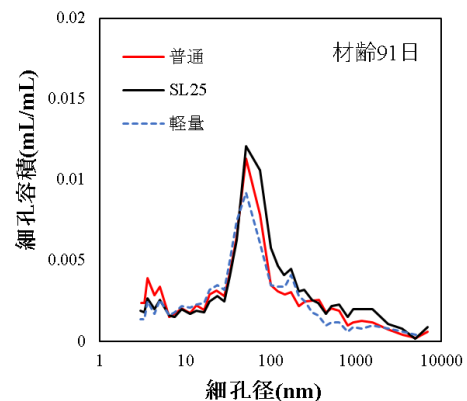


図-10 表層部の細孔径分布(シート養生)



### 3.5 細孔径分布

普通、SL25 および軽量 1 種に関し、材齢 91 日における床試験体のコア供試体から調製したモルタルの細孔径分布について、無養生の表層部の測定結果を図-8 に、無養生の中央部の測定結果を図-9 に、シート養生を施した表層部の測定結果を図-10 に示す。図-8 に示されるように、無養生の表層部において、普通では 500～1000nm のやや粗大な細孔が多く認められるが、SL25 では少なく、より小径の 50～100nm の細孔が多く存在した。また、図-9 より、無養生の中央部では、普通および SL25 の細孔径分布は類似しており、いずれも 40nm 付近の細孔が多く、分布の形状は表層部と異なっていた。特に無養生の普通では、表層部と中央部の細孔径分布の違いが顕著であることから、普通の表層部と中央部は水和の進行度合に差が生じていたと考えられる。即ち、普通の表層部は中央部と比較し水和が停滞し、やや粗大な細孔が多い脆弱部分が存在していたと思われる、そのことがコア供試体の圧縮強度にも影響し普通は SL25 より低い値になったと考えられる。一方で、図-10 に示したシート養生を施した表層部は、図-9 に示した中央部と同様の分布形状であった。これは材齢初期にシート養生を施すことで水分の蒸発が抑えられ、中央部と同様の水和反応が進行したためと考えられる。

このように、暑中環境では、シート養生等により初期材齢において水分の逸散を防ぐことが重要であるが、養生が困難な場合であっても人工軽量細骨材を適量置換することでセメントの水和反応をある程度高める効果が期待できるものと考えられる。また、軽量 1 種に関しては、他の調査よりも水セメント比が低いために相対的な比較は難しいが、表層部および中央部ともに普通および SL25 よりも小径側に細孔が分布していることから、より緻密な硬化組織であると思われる。

### 3.6 水酸化カルシウム生成量

普通と SL25 の材齢 91 日における床試験体の表層部と中央部について、(1) 式により算出した CH 生成量を図

-11 に示す。CH 生成量は普通の表層部が最も少ない値ではあったが、いずれも 1～2% 程度の違いであり各々の水和の程度の違いを示すまでの有意な差は得られなかったため、今後の検討課題である。

### 3.7 反射電子像による画像解析

普通と SL25 の材齢 91 日における床試験体の表層部コンクリートの反射電子像(観察倍率 200 倍)を写真-1 に示す。写真中の白色部分は未水和のセメント粒子であり、灰色部分は水和生成物を、黒色部分は空隙を示している。細骨材(海砂)は濃い灰色部分で形が明確であるが、人工軽量細骨材の場合は骨材の内部に多くの空隙が存在するため球状の黒色部が認められる。ここでは細骨材(海砂および人工軽量細骨材)近傍に着目し観察を行った。

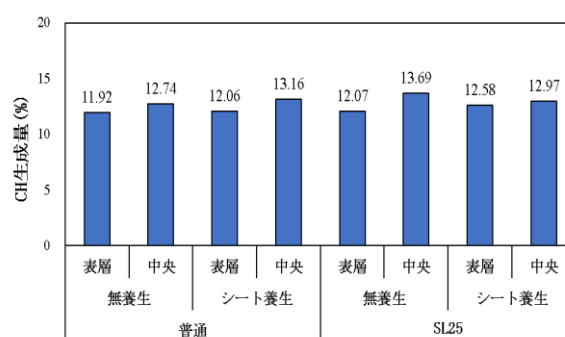


図-11 コア供試体の CH 生成量 (材齢 91 日)

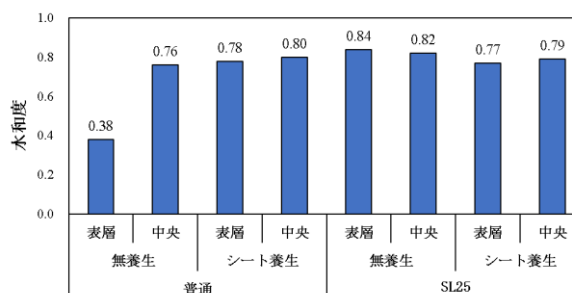


図-12 コア供試体の水和度 (材齢 91 日)

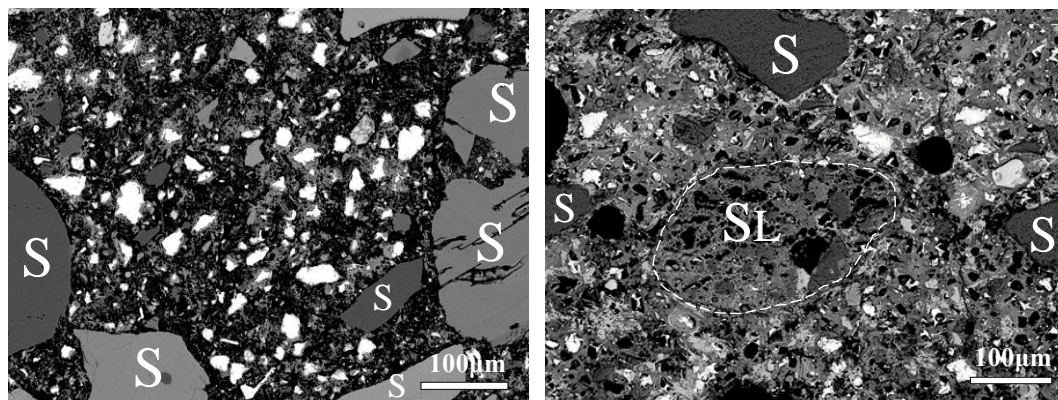


写真-1 材齢 91 日における床試験体コンクリート表層部の反射電子像 (左: 普通, 右: SL25)

普通の場合には、細骨材周辺に空隙が多く認められ、骨材に近接する遷移帯部の水和物が少ないことが判る。一方、人工軽量細骨材を含む SL25 では、骨材周辺の空隙が少なく、水和物も多く認められ、それらが骨材によく付着していることが判る。これは、吸水性の高い人工軽量骨材から骨材周辺のセメント粒子に水分が供給され、水和物の生成に寄与したものと考えられる。また、普通は白色部分である未水和セメント粒子の存在が多く目立つことから、SL25 よりも水和反応が不十分であることがうかがえる。さらに、普通は、空隙である黒色部分が水和生成物中に多く、多孔質で粗な構造をしていることがわかる。それに対し SL25 では人工軽量骨材中に認められる黒色部分を除くと、水和生成物間の空隙は普通コンクリートよりも少なく、未水和セメントを示す白色部分も少ない。この空隙の量については、前述の項目 3.5 においても、SL25 が普通と比較し、500~1000nm の粗大な空隙が少ないことが確認されているため、反射電子像による観察結果とも一致した。未水和セメント粒子や空隙が少ない SL25 では、普通よりも水和反応が進行し水和生成物が密に析出し緻密な構造を形成しているものと考えられる。これは、材齢 7 日の反射電子像においても同様であった。

撮影した反射電子像の画像解析から求めた普通および SL25 の水和度を図-12 に示す。普通の無養生表層部の水和度は他に比べて明らかに低く、乾燥による水分逸散によって水和反応が低下したと考えられる。SL25 の無養生表層部は中央部と同程度の水和度を示しており、人工軽量細骨材の自己養生効果が発揮された結果と考えられる。

一方で、シート養生の場合は、普通および SL25 にかかわらず透気係数の測定結果から判断するとより高い水和度を示すことが予想されたが、材齢 91 日では、普通の無養生表層部を除き、いずれも 8 割程度まで水和が進行しており、シート養生に優れた水和度の向上は確認することができなかった。透気係数については、コンクリートのごく表層部の水和組織の緻密さが直接的に影響する特性でもあるため、材齢初期にシート養生を施したことで、ごく表層部に緻密な水和組織が形成されるなどの要因の影響も受け、低い値を示した可能性が考えられるが水和度との関係性については更なる検討が必要である。

#### 4. まとめ

本研究では、暑中コンクリートに及ぼす人工軽量骨材の自己養生効果について、前年度および今年度の模擬部材を用いた物性評価ならびにセメントの水和に着目した各種評価を行い、以下に示す知見を得た。

- 1) 暑中環境下においても人工軽量骨材の使用により、強度発現性および耐透気性が向上した。
- 2) 反射電子像観察の結果、SL25 は人工軽量細骨材周辺である遷移帯部が緻密であり、骨材に密着している水和物が多く認められた。
- 3) SL25 の水和生成物中には、未水和セメント粒子や空隙が少なく普通コンクリートよりも緻密な構造をしており、細孔径分布による結果とも一致した。
- 4) 普通コンクリートの無養生の表層部では、他に比べて明らかに水和度が低く中央部との差が大きい、SL25 では、両者の差が小さかった。
- 5) 暑中環境などの過酷な条件下では、シート養生等により初期材齢時の水分の逸散を防ぐことが重要であるが、人工軽量細骨材を細骨材に 25%置換したコンクリートは、無養生条件下であっても強度や耐久性が向上し、セメントの水和反応の観点から人工軽量骨材の自己養生効果が有効であることが示された。

#### 謝辞

本研究の実施に際し、協力を賜りました九州大学の小山研究室一同、ならびに麻生セメント株式会社、麻生コンクリート工業株式会社の皆様に多大なご支援をいただきました。ここに感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 松藤泰典, 小山智幸, 小山田英弘, 伊藤是清: 人工軽量骨材コンクリートの自己養生機能に関する研究, 日本建築学会九州支部研究報告, Vol.40, pp.173-176, 2001.7
- 2) 成川史春: 人工軽量細骨材の自己収縮低減用材料としての適用, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.435-436, 2006.7
- 3) 河野克哉, 岡本亨久, 石川雄康, 児玉明彦: 人工軽量骨材を用いたコンクリートの収縮に及ぼす養生の影響, コンクリート工学年次論文論文集, Vol. 22, No. 2, pp.241-246, 2000
- 4) 申相澈, 小山智幸, 小山田英弘, 肥後康秀: 人工軽量骨材の自己養生効果による暑中コンクリートの物性向上に関する研究, コンクリート工学年次論文論文集, Vol.39, No.1, pp.1387-1392, 2017.7
- 5) 伊代田岳史, 魚本健人: 材齢時の乾燥がセメント硬化体の内部組織形成と物理特性に与える影響, コンクリート工学年次論文論文集, vol.25, No.1, pp.551-556, 2003.7
- 6) 井上豪, 五十嵐心一: 2,3 の手法により求めたセメントの水和度の比較, コンクリート工学年次論文論文集, vol.27, No.1, pp.541-546, 2005.7