

# 論文 軽量骨材の自己収縮ひび割れ低減効果に関する研究

表 晟哲\*1・早野 博幸\*2・野口 貴文\*3・長井 宏憲\*4

**要旨:** 本研究では軽量骨材を用いた拘束下における高強度コンクリートの自己収縮低減効果を定量的に示すとともに、水和反応の指標となる物性や破面観察などの観点から軽量骨材の自己収縮低減効果を実証することを目的とした。その結果、表面乾燥状態の軽量骨材を使用することにより、普通コンクリートに比べて自己収縮ひび割れおよび引張応力が低減できることを定量的に示し、ひび割れの危険性が低いことが明らかとなった。軽量骨材の自己収縮低減効果に関しては、骨材周辺におけるセメントペーストの化学分析や組成像観察により、軽量骨材内部の水分がセメントペースト部分へ供給されている可能性を示した。

**キーワード:** 高強度コンクリート, 軽量骨材, 自己収縮, ひび割れ, 細孔構造, 水酸化カルシウム

## 1. はじめに

近年のコンクリート構造物の高層化に伴い、高強度コンクリートに関する研究開発が活発に行われている。高強度コンクリートはスパンの長大化や高層化だけではなく、高耐久化も実現可能とする材料であるが、水セメント比が低い場合、若材齢時において自己収縮ひび割れの発生が懸念される<sup>1)</sup>。また、部材断面が大きい場合、単位セメント量の増大に起因する自己収縮や温度変形などによって拘束条件の厳しい場合にはひび割れの発生が懸念される。高強度コンクリート特有の現象である自己収縮を低減する方法は様々なものが挙げられるが、その中で、大量の水分を保有する軽量骨材の適用は、自己収縮の要因となる自己乾燥を低減する効果的な手法である。

そのメカニズムとして、骨材中の水分がペーストに供給され自己乾燥を抑制していることが推定されるが、実際にこの現象が確認されているわけではない。以上のような背景から、本研究では軽量骨材を用いることによる拘束下における高強度コンクリートの自己収縮低減効果を定量的に示すとともに、セメントペーストの水酸化カルシウム量や結合水量などの水和反応の指標となる

物性や、細孔組織、骨材近傍の破面観察などの観点から軽量骨材の水分供給による自己収縮低減メカニズムを実証することを目的とした。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料及び調合

コンクリートの使用材料を **Table.1** に示す。シリーズ1の実験では、軽量骨材の含水状態がコンクリートの自己収縮へ及ぼす影響についても検討するため、絶乾状態及び表乾状態の軽量粗骨材と、比較として普通骨材を用いた3種類のコンクリートを対象に実験を行った。各コンクリートの調合を **Table.2** に示す。調合条件は水セメント比25%、空気量2%とし、コンクリートの練り混ぜは100Lパン形ミキサを使用してモルタルを90秒間練り混ぜ、その後、粗骨材を投入して90秒間練り混ぜた。

### 2.2 シリーズ1：拘束下のひび割れポテンシャル評価

#### (1) 自由収縮試験

自由収縮試験は、JCI 自己収縮委員会報告書で提案されている「セメントペースト、モルタル及びコンクリートの自己収縮及び自己膨張試験方法」に準じて行った。自由変形量の測定は養生温度を20℃とし、型枠底部には

**Table.1 Materials (Series 1)**

Material	Characteristics	
Ordinary Portland Cement	Density : 3.16g/cm <sup>3</sup> Specific surface area : 3290 cm <sup>2</sup> /g	
Coarse aggregate	Saturated Surface dry Density : 2.64g/cm <sup>3</sup>	Water absorption : 0.60%
Light-Weight Aggregate	Surface dry Density : 1.65g/cm <sup>3</sup>	Water content : 32%
		Water content : 0%
Land Sand	Surface dry Density : 2.59g/cm <sup>3</sup>	Water absorption : 1.97%

\*1 東京大学大学院 工学系研究科建築学専攻 大学院生(正会員)

\*2 太平洋セメント(株) 中央研究所 工博 (正会員)

\*3 東京大学大学院 工学系研究科建築学専攻 准教授 工博 (正会員)

\*4 東京大学大学院 工学系研究科建築学専攻 助教 工博 (正会員)

**Table.2 Mix proportions (Series 1)**

Symbol	W/C(%)	s /a(%)	Air Content(%)	Unit content (kg/m <sup>3</sup> )			
				W	C	S	G
N-O	25	44.9	2.0	160	640	719	903
LW-S							561
LW-D							425

※Symbol N-O : Ordinary concrete in case of using Normal Aggregate(Saturated Surface dry condition), LW-S : Concrete in case of using Light-Weight Aggregate(Surface dry condition), LW-D : Concrete in case of using Light-Weight Aggregate (Absolute dry condition)

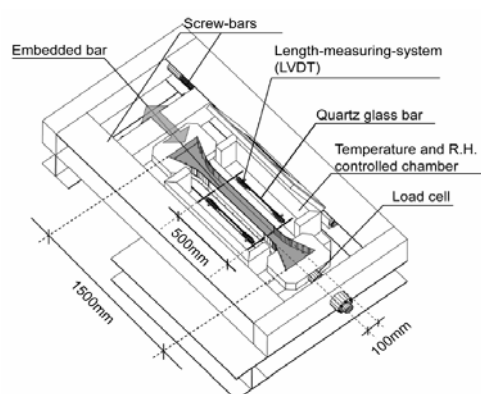
摩擦低減のためテフロンシートを敷き、ポリエステルフィルムで密閉して100×100×400mm直方体の両端にガイドを埋設し、低圧型接触変位計（反力 0.25N）によって測定を行った。

**(2) 擬似完全拘束試験**

コンクリートを擬似的に完全拘束する試験としては Fig.1 に示す可変拘束応力試験機 VRTM (Variable Restraint Testing Machine) を用いた。本試験機は、中央に打ち込まれたコンクリートの変位ならびに応力状態をモニタリングし、クロスヘッドを任意に制御することによって様々な拘束条件を擬似的に再現することが可能である。本実験では、既往の研究<sup>2)</sup>を参考にして測定区間（長さ 500mm 断面 100×100mm）のひずみトリガーを 4μ, 応力トリガーを 0.01N/mm<sup>2</sup>として擬似完全拘束状態とした。

**(3) 強度試験**

VRTM で材齢 1, 7 日の測定終了後、クロスヘッドを強制的に移動させて供試体の直接引張試験を行い、ひび割れ破断時の引張強度をひび割れ発生強度とした。また、材齢 1, 3, 7, 28 日に φ10×20cm の封緘供試体で割裂引張試験、材齢 7, 28 日に圧縮強度試験を行った。



**Fig.1 Variable Restraint Testing Machine(VRTM)**

**Table.3 Materials (Series 2)**

Material	Characteristic
Ordinary Portland Cement	Density : 3.16g/cm <sup>3</sup> Specific surface area : 3110 cm <sup>2</sup> /g
Coarse aggregate	Saturated Surface dry Density : 2.64g/cm <sup>3</sup> Water absorption : 0.60%
Light-Weight Aggregate	Surface dry Density : 1.65g/cm <sup>3</sup> Water content : 32%

**2.3 シリーズ 2 : 化学分析及び細孔構造観察による評価**

**(1) 試験体**

化学分析及び細孔構造観察用試験体の使用材料を Table.3 に示す。粗骨材からセメントペーストに供給される水分の影響を検証するため、試験体は砂は使用せず、その砂をセメントペーストに置換して Table.4 のような調合で実験を行った。W/C25%のセメントペーストに φ15~20mm 粗骨材を練り混ぜ、φ10×20cm の円柱型枠に打ち込みモデル試験体とした。養生は 20℃封緘とし、所定の材齢に達した後、ペースト部分の試料を採取した。分析用試料中に粗骨材が混入しないようにするため、骨材の界面から 2mm~7mm の距離における部分を水、熱を加えないようにハンマー等で破碎し、試料採取後アセトンに浸漬して水和を停止させ、105℃乾燥してから試験を行った。別途、組成像観察用の試験体は W/C25%のセメントペースト φ10×20cm の円柱型枠の中程まで打ち込み、

**Table.4 Mix proportions (Series 2)**

Symbol	W/C (%)	Unit content (kg/m <sup>3</sup> )				
		W	C	SP	S	G
P-N	25	276	1102	2.56	—	903
P-LW						561

※Symbol P-N : Specimen in case of using Normal aggregate(Saturated Surface dry condition), P-LW : Specimen in case of using Light-Weight aggregate(Surface dry condition)

**Table.5 Experiment level and Material age(Series 2)**

1 day	3 day	7 day	28 day
I, D, P, B	I, D, P	I, D, P	I, D, P, B

I : ig.loss, D : DTA, P : Porosity, B : BEI

中央部に粗骨材を1個設置し、その後セメントペーストを上端まで打ち込んで組成像観察用試験体とした。骨材が中心になるようにダイヤモンドカッターで円板状に切断してからアセトンで水和を停止させた。

#### (2) 試験水準及び材齢

試験は、Table.5 に示すように表乾状態の普通骨材および軽量骨材を用いた細骨材抜きコンクリートモデルを各々P-N及びP-LWとし、各材齢で所定の場所から採取した試料を対象に実施した。組成像観察は、材齢1日、28日のみについて実施した。

#### (3) 強熱減量 (ig.loss)

試料をメノウ乳鉢で微粉碎し、JIS A 5202「ポルトランドセメントの化学分析方法」に準拠して測定した。

#### (4) 示差走査熱分析 (DSC)

所定の材齢に達した試料をメノウ乳鉢で微粉碎し、DSC試験機を使用して測定を行い、水酸化カルシウム量を算出した。測定条件は、昇温速度：10°C/分、測定温度：室温～600°Cで行い、空気中の二酸化炭素による炭酸化を防ぐため、窒素ガスを流入し、同雰囲気下で昇温した。

#### (5) 組成像観察 (BEI)

骨材とペーストの界面が含まれるようにして20mm角程度の大きさに硬化体試料を成形し、エポキシ樹脂中に包埋して鏡面研磨を行い、導電性を持たせるために炭素蒸着を行った後、X線マイクロアナライザーを用いて反射電子像観察を行った。

#### (6) 細孔径分布 (Porosity)

所定の材齢に達したのち、水銀圧入式ポロシメーターにて試料の細孔径分布測定を行った。

### 3. 実験結果及び考察 (シリーズ1：拘束下のひび割れポテンシャル評価)

#### 3.1 自由収縮ひずみ

各コンクリートの凝結始発時から7日までの自由変形ひずみを Fig.2 に示す。材齢7日においては、N-Oの場合に比べてLW-Dの場合は自己収縮ひずみを約300 $\mu$ 低減することができた。一方、LW-Sの場合は収縮せず200 $\mu$ の膨張傾向を示し、結果的に約600 $\mu$ の自己収縮低減効果が示された。

#### 3.2 擬似完全拘束下における応力

擬似完全拘束下の応力を Fig.3 に示す。N-Oは、若材齢時に自己収縮ひずみが增大するため、急激に引張応力が增大し、その後も徐々に増加する傾向がみられる。軽量骨材を用いたコンクリートに関しては、材齢1日の時点では骨材の含水状態に関わらず一時的に応力が圧縮となっているが、その後の挙動は大きく異なり、LW-Dはほぼ一定の速さで引張応力が增大する傾向を示した。

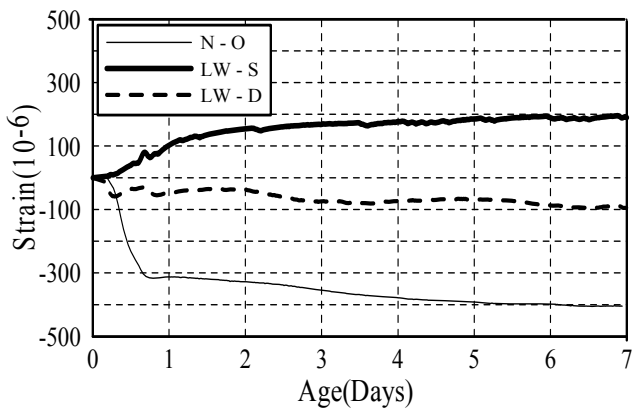


Fig.2 Autogenous Shrinkage strain

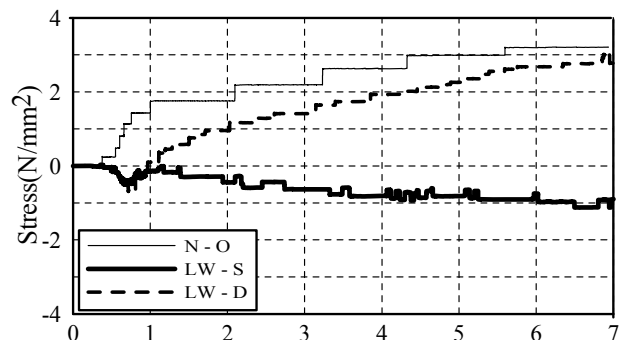


Fig.3 Shrinkage Stress changes under quasi-complete restraint

これは、LW-Dの絶乾軽量骨材が練混ぜ時などの極若材齢時において一時的に吸水し、それを材齢1日までの間に自己乾燥を生じているペーストマトリック中に供給して一旦は膨張傾向を示したが、その吸水量はLW-Sの軽量骨材と異なり微量であるため、すべての水を放出した後、自己乾燥が生じ、自己収縮が増大していったものと考えられる。しかし、LW-Sは材齢1日以後からほぼ一定の速度で圧縮応力が上昇する傾向が示された。これは、軽量骨材の含水状態が自己収縮低減効果に最も重要な影響を与えることを示したと考えられる。

#### 3.3 強度特性によるひび割れポテンシャル評価

材齢1, 7日まで擬似完全拘束下で測定を行った後、クロスヘッドの強制移動による試験体の引張荷荷を行い、ひび割れ発生強度の測定を行った。VRTMによる直接引張試験で得られた直接引張強度に対する拘束応力の比 (VRTM 拘束応力/直接引張強度) をひび割れポテンシャルとし、各コンクリートの評価を行った。材齢1, 7日各々の直接引張強度をベースとしたひび割れポテンシャル結果を Fig.4 に示す。既往の研究<sup>3)</sup>においては、直接引張強度と割裂引張強度はほぼ同等という結果が得られておりともに試験で偏心などが生じなければ本質的に同一と考えられる。本研究では若材齢における直接引張強度が割裂引張強度試験の結果 (Fig.6) と同様な強

度発現比を生じるものと仮定して材齢7日の直接引張強度に基に材齢1, 3日の直接引張強度を推定し, Fig.5のようにひび割れポテンシャルの推移を算出した。Fig.5より, 材齢1日においては, LW-S及びLW-Dは含水状態に関わらずN-Oに比べてひび割れの危険性は非常に低いことが分かる。材齢7日では, LW-DはFig.3に示すように引張応力が増大していることから, ひび割れ危険性はN-Oと同程度となっているが, LW-Sは材齢7日においても圧縮応力を保持しており, 自己収縮によるひび割れポテンシャルは極めて低いことが定量的に明らかとなった。また, Fig.5で推定した材齢1日のひび割れポテンシャルと Fig.4で算出した結果は同様な傾向を示していることから, 各材齢全てにおいてVRTMによる直接引張強度試験を実施しなくても, 各材齢の割裂引張強度と特定の材齢で直接引張強度試験を行うことで自己収縮によるひび割れポテンシャルの推移を推定することが可能である。各材齢の引張強度及び圧縮強度の結果を Fig.6及び Fig.7に示す。引張強度において, LW-Dは材齢3日より7日に強度が下がっておりLW-S及びN-Oに比べ, ばらつきが大きい傾向を示した。圧縮強度においては, LW-S及びLW-DはN-Oに比べて圧縮強度が低くなる傾向を示した。軽量コンクリートの中でもLW-SはLW-Dに比べ, 材齢28日には $10\text{N/mm}^2$ 以上の差が出ており, 軽量骨材の含水状態は自己収縮量とともに強度発現にも影響を与えることを確認することができた。

#### 4. 実験結果および考察(シリーズ2: 化学分析および細孔構造観察による評価)

##### 4.1 化学分析結果

普通骨材を用いた試験体(P-N)に比べ, 表面乾燥状態の軽量骨材を用いた試験体(P-LW)では, 軽量骨材中の水分がセメントペーストマトリックスに供給されていると考えた場合, 粗骨材間のペーストでは水分供給によって水セメント比がより高くなり, セメントペースト部分の水和進行速度が速くなると考えられる。その影響によって結合水量, 水酸化カルシウム生成量が多くなることが予想される。分析から得られた各試験体のセメントペーストの結合水量および水酸化カルシウム量の結果をそれぞれ Fig.8および Fig.9に示す。Fig.8より, P-LWの場合は材齢1日から28日まで全水準においてP-Nに比べ結合水量が上回る傾向を示した。また, Fig.9により, 水酸化カルシウム生成量もP-LWの方がP-Nに比べ, 各材齢で値が大きくなる傾向を示し, 若材齢時に表乾状態の軽量粗骨材からセメントペーストマトリックスに水分の供給が行われていることが分析結果より間接的に確認できた。

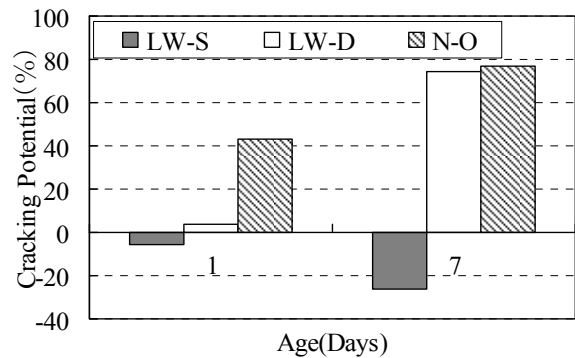


Fig.4 Results of evaluation cracking potential

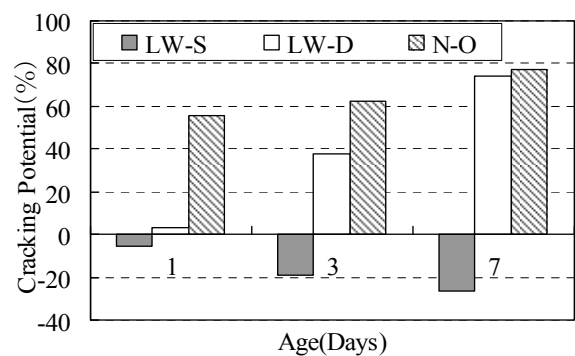


Fig.5 Results of evaluation cracking potential

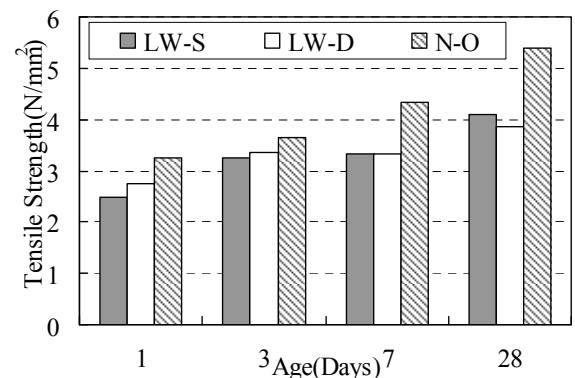


Fig.6 Results of Tensile stress

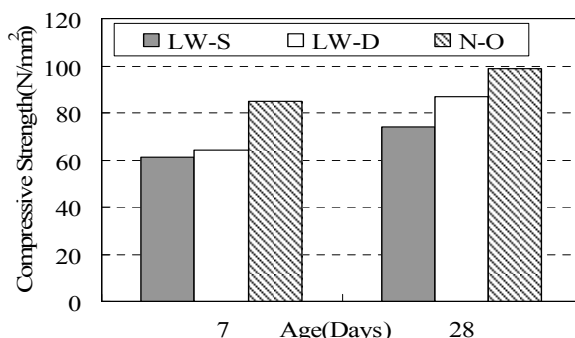


Fig.7 Result of Compressive Strength

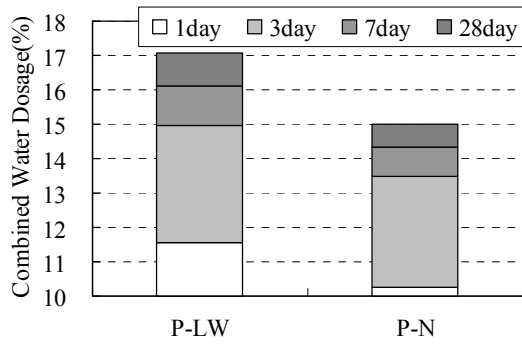


Fig.8 Combined Water Dosage

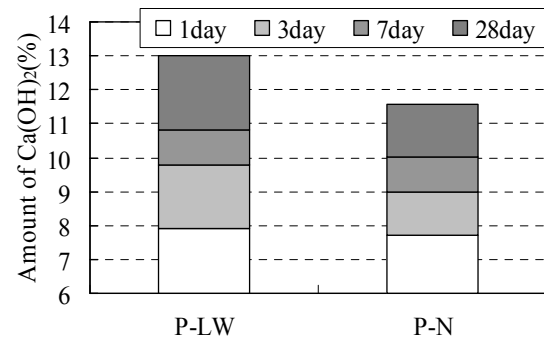


Fig.9 Amount of Ca(OH)<sub>2</sub>

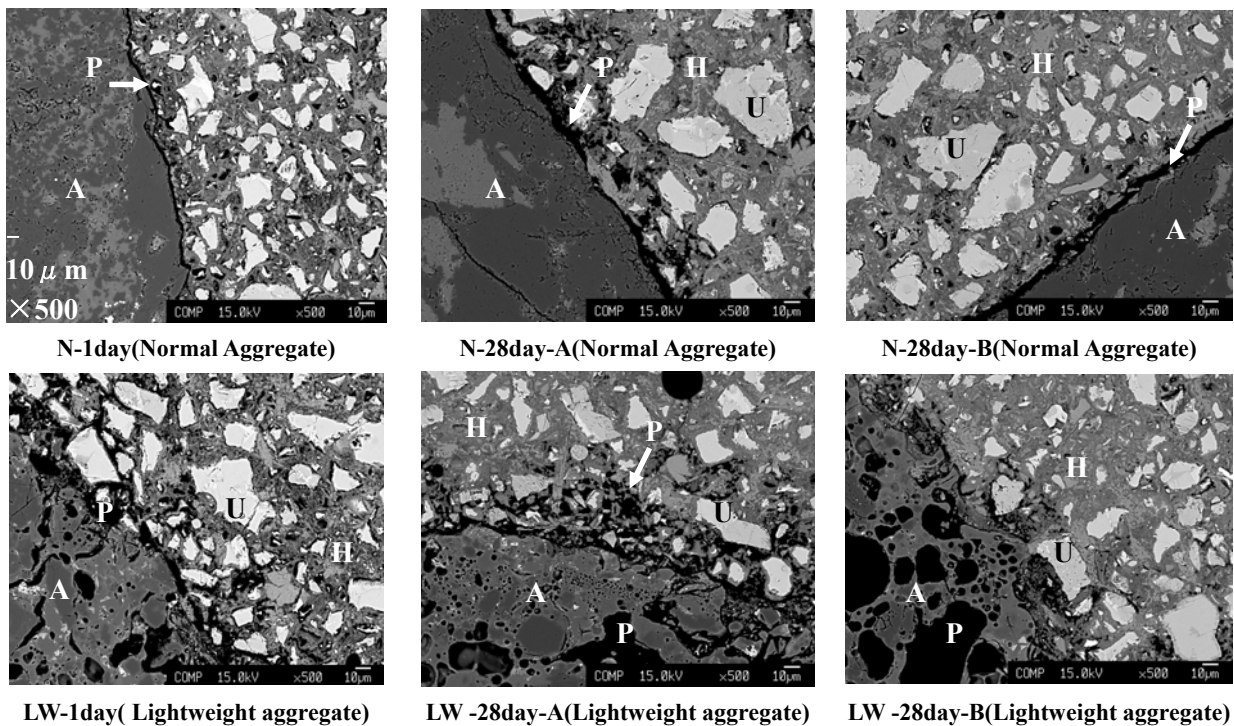


Fig.10 Interface between aggregate and cement paste (BEI)

#### 4.2 組成像観察 (BEI)

粗骨材からの水分供給を可視的に確認するためセメントペーストの界面の組成像観察を行った。材齢 1, 28 日 2ヶ所の組成像観察結果を Fig.10 に示す。

反射電子像は、物質を構成する鉱物の平均原子番号の違いにより明暗が生じ、平均原子番号が大きいものほど明るく観察されるものである。白色部分は未水和セメント粒子(U)、灰色部分はセメント水和物(H) (水和物の種類や緻密さによって明暗が生じる)、黒色部分は空隙(P)である。両者を比較すると、普通骨材界面には数 μm 程度の空隙層が存在しているが、軽量骨材界面では 10μm 以上の粗い空隙部分と骨材内部の連通気孔が連続して生じていることが分かる。この空隙構造から、軽量骨材内部の水分がセメントペースト部分へ供給されやすい形態となっていることが伺える。

材齢 28 日の組成像観察結果、普通骨材界面では 10μm

程度の空隙が生じていることがわかる。材齢 1 日より 28 日には空隙が大きくなっており、これはセメントペーストの収縮によって空隙層が大きくなったと判断される。普通骨材界面に比べ、軽量骨材界面では、LW-28day-B のように骨材とセメントペーストの界面が材齢 1 日より緻密になっており骨材とセメントペーストの付着が良好になっていることが確認できた。しかし、軽量骨材界面の中では、LW-28day-A のように 20μm 以上の粗い部分も存在していることを確認した。これは若材齢時、軽量骨材から供給される水分によって骨材の周りの水セメント比が局所的に高くなって生じた空隙であると推定される。軽量コンクリートは骨材自体の強度が低いため普通コンクリートに比べて強度低下するが、このように表面乾燥状態の軽量骨材を使用した場合に骨材界面に生じた空隙もコンクリート若材齢時の強度低下の一つの原因になると考えられる。

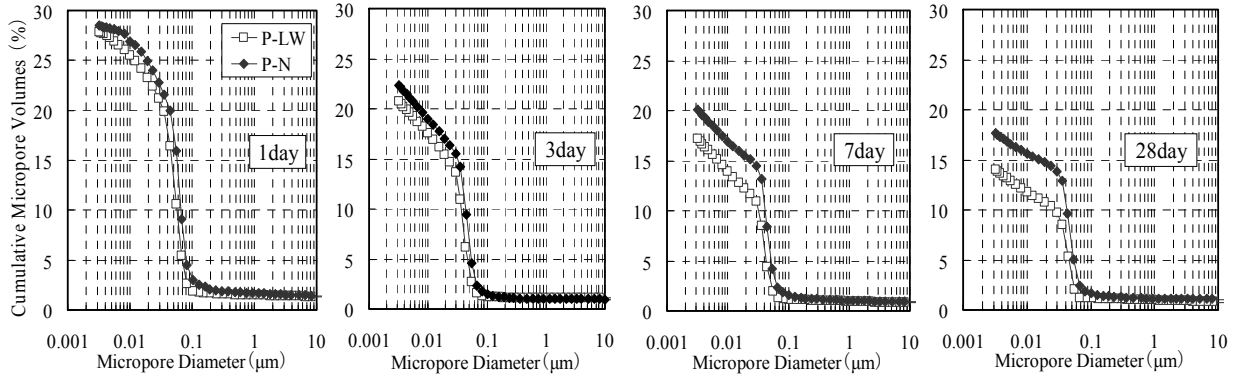


Fig.11 Cumulative micropore volume in paste (%)

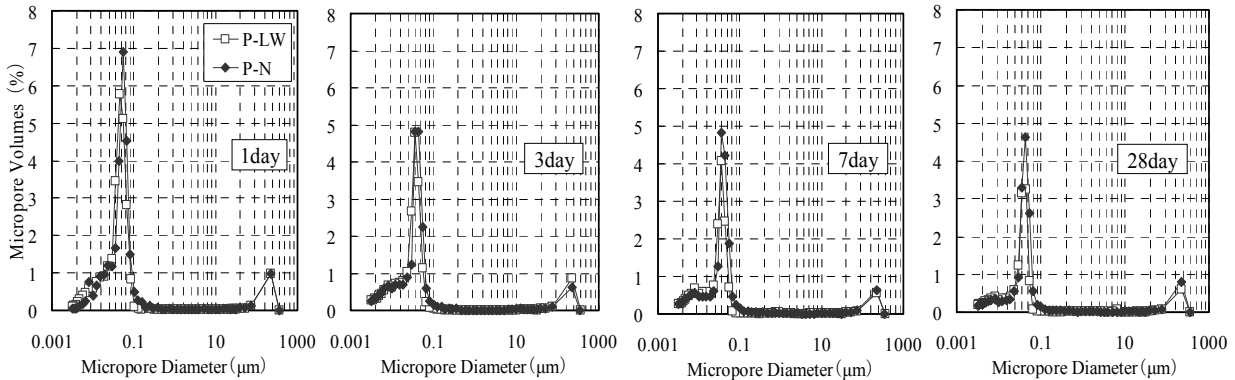


Fig.12 Micropore volume in paste (%)

### 4.3 細孔径分布

骨材から2~7mmの距離における材齢1, 3, 7, 28日のペースト積算空隙量と細孔空隙分布の結果をFig.11およびFig.12に示す。積算空隙量は材齢1日から両骨材を用いた試験体間で若干の差異が生じ、材齢の経過に伴いその差が大きくなっていることがわかる。一般的には、同条件の場合、W/Cが小さいペーストの方が積算空隙量は小さくなるはずである。本実験では、材齢初期においてはP-LWの見かけ上のW/Cが大きくなったことが想定されるが、その後の軽量骨材からの水分の供給が徐々に行われることによる内部養生効果により、ペースト部の積算空隙量が普通骨材に比べて小さくなったと推察される。したがって、ペーストマトリックス部の強度に関しては、P-NよりもP-LWの方が高くなっている可能性が示唆されるが、実際のコンクリートとしての強度は、軽量骨材自体の強度や界面の脆弱さが原因で、軽量コンクリートの方が低下するものと考えられる。細孔空隙分布では、P-LWの方がP-Nに比べ水分供給によって水和反応進行がより早くなり、0.01~0.1μmの毛細管空隙の領域<sup>4)</sup>の空隙が一層減少する傾向が見られた。

### 5. まとめ

本研究では軽量骨材を用いることによる拘束下における高強度コンクリートの自己収縮低減効果を定量的

に示すとともに軽量骨材からセメントペーストへの水分供給を実証することを目的として検討を行った。本研究で得られた結果は以下の通りである。

- (1) 表面乾燥状態の軽量骨材を使用することにより、普通コンクリートに比べて自己収縮ひずみおよび引張応力が低減できることを定量的に示し、ひび割れの危険性が低いことを明らかにした。
- (2) 軽量骨材の自己収縮低減効果に関して、骨材周辺におけるセメントペーストの化学分析や組成像観察により、軽量骨材内部の水分がセメントペースト部分へ供給されている可能性を示した。

### 参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：自己収縮研究委員会報告書，pp.97-101，2002
- 2) 丸山一平ほか：擬似完全拘束下における若材齢高強度コンクリートの性状に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.25，No.1，pp.485-490，2003
- 3) 米田俊一ほか：各種低熱セメントを用いたコンクリートの伸び特性、土木学会第47回年次学術講演会変梗概集，pp.732-733，1992
- 4) P. Kumar Mehta, et al. : Concrete Microstructure, Properties, and Material, pp.26-27, 1986