

論文 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

河野 克哉*¹・岡本 享久*²・石川 雄康*³・児玉 明彦*⁴

要旨：本研究は、養生の期間ならびに方法が人工軽量骨材を用いたコンクリートの収縮に与える影響について検討したものである。その結果、養生期間を長くすることで、骨材が低含水状態の場合には乾燥収縮が低減されるものの、高含水状態になると骨材含水が養生水として作用しペースト組織が緻密化するため、収縮はほとんど低減されないことがわかった。また、養生方法の影響では封緘養生よりも水中養生とした方が乾燥収縮が増大する傾向を示すが、この傾向は、普通骨材や低含水状態の軽量骨材を用いた場合、水中養生によって緻密なペースト組織が形成されやすくなるために顕著となることもわかった。

キーワード：軽量骨材, 含水率, 養生, 細孔構造, 自己体積変化, 自己乾燥, 乾燥収縮

1. はじめに

近年、高性能減水剤や微粉材料の利用技術を応用し、人工軽量骨材を用いたコンクリートの高強度化や高流動化が行われるようになった¹⁾。また、従来の膨張頁岩系の軽量骨材よりも吸水性が低く、作業性や耐久性に優れた骨材も開発され、軽量骨材自体の高性能化も進んでいる²⁾³⁾。

これまで筆者らは水結合材比の低減や粉体量の増大を行った軽量骨材コンクリート、ならびに新しく開発された低吸水性の高性能軽量骨材を用いたコンクリートの自己収縮ならびに乾燥収縮について検討を行ってきた⁴⁾。その結果、コンクリート内部で生じる軽量骨材中の水分移動が収縮機構に関与していることがわかった。

本研究では、軽量骨材中の水分の移動現象とペーストの細孔構造変化の關係に着目しながら、養生の期間ならびに方法が人工軽量骨材を用いたコンクリートの収縮に与える影響を考察した。

2. 実験概要

2.1 使用材料

実験に使用した材料を表-1 に示す。結合材

には普通セメントを用いた。細骨材には小笠産陸砂を、粗骨材には新しく開発された高性能軽量骨材(以下 HLA)、膨張頁岩を原料とする市販の非造粒型軽量骨材(以下 LA)、および青梅産普通碎石(以下 CS)の3種類を用いた。また、混和剤は高性能 AE 減水剤ならびに AE 剤を用いた。

2.2 配合

配合条件を表-2 に示す。すべての配合において単位水量ならびに単位セメント量を一定とし、W/C=30%とした。また、粗骨材の種類ならびに含水率(含水状態)は、表に示すように変化させた。なお、スランプならびに空気量はそれぞれ $12 \pm 2.5\text{cm}$, $5.5 \pm 1.5\%$ の範囲とした。

2.3 練混ぜ方法

セメントならびに骨材をオムニミキサに投入し15秒間空練りした後、水ならびに混和剤を投入して105秒間の練混ぜ(計120秒間)を行った。

2.4 養生ならびに乾燥の条件

養生ならびに乾燥時の環境条件を図-1 に示す。材齢1日までは、いずれの供試体も表面からの水分逸散を防止した状態で型枠中に存置した(図-2 参照)。供試体は材齢1日で脱型して養

*1 太平洋セメント(株) 中央研究所 第二研究部 研究員 工修 (正会員)

*2 太平洋セメント(株) 中央研究所 第二研究部 第二研究部長 工博 (正会員)

*3 太平洋セメント(株) 中央研究所 第二研究部 リーダー 工修 (正会員)

*4 太平洋セメント(株) 中央研究所 第二研究部 研究員 (正会員)

表-1 使用材料

(a) 結合材, 細骨材ならびに混和剤

使用材料	種類	記号	物性または成分
結合材	普通ポルトランドセメント	C	密度: 3.15g/cm^3 , 比表面積: $3350\text{cm}^2/\text{g}$
細骨材	小笠産陸砂	S	表乾密度: 2.60kg/L , 吸水率: $1.86\text{wt.}\%$, 粗粒率: 2.83
混和剤	高性能 AE 減水剤	SP	成分: ポリカルボン酸基含有多元ポリマー
	AE 剤	AE	成分: 変性アルキルカルボン酸化合物

(b) 粗骨材

種類	原料および製造方法	記号	絶乾密度 (kg/L)	24時間吸水率*1		煮沸吸水率*2		最大寸法 (mm)	粗粒率
				(wt.%)	(vol.%)	(wt.%)	(vol.%)		
高性能軽量骨材	真珠岩, 回転造粒	HLA	0.96	4.52	4.34	12.2	11.7	15	6.47
非造粒型軽量骨材	膨張真岩, 非造粒	LA	1.33	10.1	13.4	21.7	28.9	15	6.40
普通碎石	青梅産硬質砂岩	CS	2.62	0.74	1.94	—	—	15	6.51

*1 24時間静水に浸漬して表乾状態にしたときの含水率 *2 2時間煮沸して表乾状態にしたときの含水率

表-2 配合条件

No.	配合条件								フレッシュおよび硬化コンクリートの性状					
	W/C (%)	s/a (%)	粗骨材 G の条件			単位量 (kg/m ³)			Slump (cm)	Air (%)	単位容積 質量 (kg/m ³)	圧縮強度 水中 28 日 (MPa)	弾性係数 水中 28 日 (GPa)	
			種類	含水率 (vol.%)	含水状態	単位量 (L/m ³)	W	C						S
1	30	42.2	HLA	4.34	24h 吸水	350	165	550	664	14.5	6.0	1729	51.4	22.0
2				11.7	煮沸吸水					12.5	5.5	1773	53.5	22.5
3			LA	13.4	24h 吸水					13.5	5.8	1901	58.9	25.4
4			CS	1.94	24h 吸水					12	4.1	2338	73.8	35.3

生を開始し, 養生条件は①材齢 14 日まで封緘養生(20°C), ②材齢 1 日まで封緘養生(20°C), ならびに③材齢 14 日まで水中養生(20°C)の 3 水準とした。乾燥は, 所定の養生終了後, 20°C , 60%R.H. の条件にて行った。なお, 比較として全材齢を通じて封緘状態(20°C)で保存する供試体を用意した。なお, 封緘状態とする場合には供試体全面をポリエステルフィルムならびにアルミ粘着テープでシールし, 外部からの水分浸入ならびに供試体からの水分逸散が生じない状態とした。

2.5 長さ変化の測定

(1) 材齢 24 時間以前の測定方法

図-2 に示すように型枠($10\times 10\times 40\text{cm}$)内の底面に摩擦を断つためのテフロンシート, 両端

面に自由な変形の拘束を防ぐためのポリスチレンボード, および打設面も含めた全面に水分逸散を防ぐためのポリエステルフィルムを施し, コンクリートを打込んで 20°C , 80%R.H. の恒温恒湿室に静置した。始発時間に達した時点から, 供試体両端部に設置したゲージプラグの移動量を非接触型変位センサにて測長した。なお, ひずみの算出では, 供試体中心部の熱電対にて水和熱を測定し, コンクリートの線膨張係数を $10\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ と仮定して長さの補正を行った。

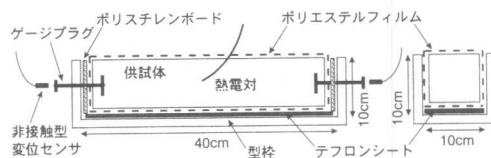


図-2 収縮ならびに膨張ひずみの測定方法

(2) 材齢 24 時間以降の測定方法

供試体は上記試験が終了後脱型し, 所定の環境条件で保管した。供試体両端部にコンタクトチップを貼付け, 所定材齢でデジタル式マイク

材齢	0日	1日	14日	28日	182日
①封緘養生(長期)		封緘	60%R.H. 乾燥		
②封緘養生(短期)		封緘	60%R.H. 乾燥		
③水中養生		封緘	20°C 水中	60%R.H. 乾燥	
④比較用供試体			封緘		

図-1 養生ならびに乾燥の条件

ロメータにて測長した。また、同時に供試体質量を測定し、供試体からの逸散水量を算出した。

2.6 ペースト部の細孔径分布の測定

細孔径分布は水銀圧入法にて測定した。測定試料には長さ変化測定用の供試体と同一環境条件とした円柱供試体(φ 10×20cm)を用い、所定材齢で5mm程度に粗砕し、アセトンに浸漬して水和を停止させた後、D-乾燥(凍結後減圧して水を昇華させる乾燥法)したものを用いた。

3. 実験結果および考察

3.1 養生期間が及ぼす影響

各粗骨材を用いたコンクリートにおいて乾燥開始までの封緘養生期間を1日ならびに14日に変化させた場合の長さ変化をそれぞれ図-3ならびに図-4に示す。なお、これらの図では長さ変化の基点を凝結の始発とした。また、全材齢を通じて封緘養生した場合の結果、すなわち各供試体の自己体積変化も併記した。この自己体積変化は、これまで筆者らが明らかにしたように、CSならびにHLAを24時間吸水させ粗骨材が低含水状態の場合はペースト部が自己乾燥して収縮ひずみが発生するが、煮沸吸水したHLAや24時間吸水したLAのように高含水状態となる場合には粗骨材中の水分がペースト部に供給されて自己乾燥を生じず、ペースト組織が膨潤して膨張ひずみが発生する⁴⁾。

乾燥開始から材齢182日までの各供試体の収缩量(すなわち乾燥収缩量)を考えると、養生期間1日の場合、低含水骨材(24時間吸水CSならびに24時間吸水HLA)は $740 \sim 780 \times 10^{-6}$ 程度、高含水骨材(煮沸吸水HLAならびに24時間吸水LA)は $660 \sim 760 \times 10^{-6}$ 程度となり、粗骨材の含水量が少ない場合に乾燥収縮が若干大きくなった。一方、養生期間14日の場合、低含水骨材は、いずれも 560×10^{-6} 程度、高含水骨材では、いずれも 710×10^{-6} 程度となり、逆に粗骨材の含水量が少ないほど乾燥収縮が小さい傾向を示した。このように粗骨材の含水量が少ない場合には、養生期間を長くすることで乾燥収縮量が $200 \times$

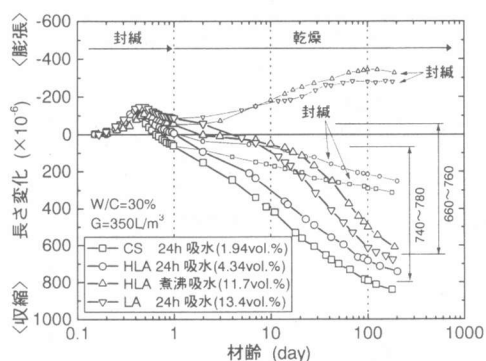


図-3 養生期間1日の供試体の長さ変化

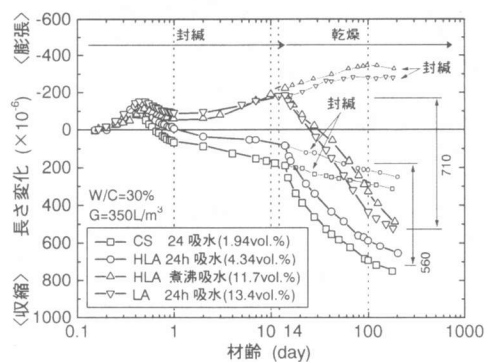


図-4 養生期間14日の供試体の長さ変化

10^{-6} 程度低減されるが、粗骨材の含水量が多い場合には養生期間による収缩量の変化は 50×10^{-6} 程度であり、収縮の低減効果は小さくなる。

図-5は、乾燥開始前の封緘養生材齢1日と14日、および封緘養生材齢1日後乾燥した材齢14日の各供試体においてペースト部の細孔径分布を示したものである。養生期間1日までのペースト組織は、粗骨材の含水量が少ないほど緻密であり、この時点から乾燥を開始するとCSならびに24時間吸水HLAでは細孔に大きな毛細管張力が生じ、乾燥収缩量が増加しやすい傾向にあると考えられる。乾燥後材齢14日の細孔構造は材齢1日までと同様、骨材含水量が少ないほど緻密な傾向となっている。また、いずれの供試体も材齢の経過ならびに乾燥の影響で組織が緻密化するが、 $10 \sim 100 \mu m$ 程度の比較的粗大な細孔はそのまま残存する形となっている。一方、材齢14日まで養生した場合は、逆に粗骨

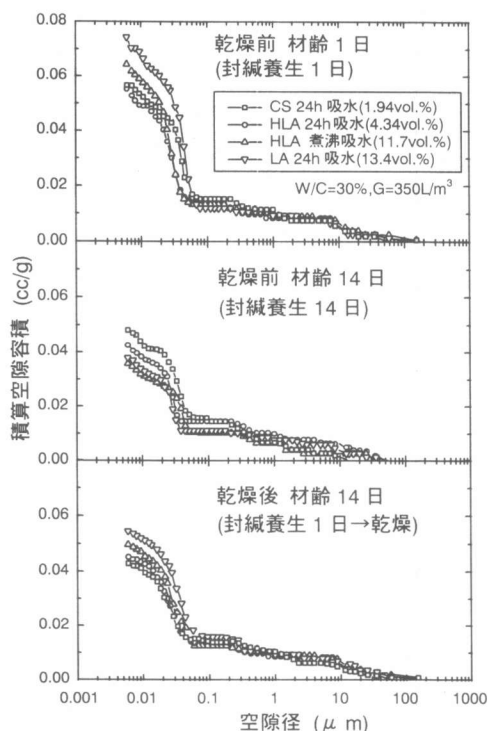


図-5 養生期間による細孔径分布の変化

材含水量が多いほど緻密化しており、この時点から乾燥を開始すると、煮沸吸水 HLA ならびに 24 時間吸水 LA を用いた場合は、収縮が低減されにくいと考えられる。また、CS ならびに 24 時間吸水 HLA を用いた場合は細孔が粗大であること、および封緘養生 14 日までに $100 \sim 200 \times 10^{-6}$ 程度の自己収縮を生じて乾燥開始以前に供試体がすでに自己乾燥していることなどによって乾燥収縮量が低減されるものと思われる。

ところで、封緘養生期間と骨材含水率によってペーストの細孔構造が相違する機構については以下のように考察した。材齢 1 日までの若材齢では、ペーストの組織骨格は強固でなく粗骨材含水量が多いと粗骨材の水分が供給されて組織骨格が緩んで粗となるが、含水量が少ない場合には自己乾燥を生じて収縮力が発生し組織骨格が締まって密になると思われる。一方、養生期間が長くなると、粗骨材含水量が多い場合はペーストに供給された粗骨材の水分が養生水として利用され水和により密実な組織がつくられ

るが、含水量が少ない場合は粗骨材含水量が枯渇して水和に必要な水分が十分に供給されず未水和の粗大な空隙組織になるものと思われる。

3.2 養生方法及び影響

各粗骨材を用いたコンクリートにおいて乾燥開始までの養生方法を水中養生ならびに封緘養生とした場合の長さ変化を図-6 ならびに図-7 に示す。まず、図-6 に示す同一粗骨材の場合において養生期間中(材齢 14 日まで)の長さ変化に着目すると、いずれの含水状態の場合にも水中養生とすることで膨張するが、養生方法による膨張の影響(封緘養生供試体を基準と考えた水中養生供試体の膨張量)は 24 時間吸水 HLA、すなわち含水量が少ないほど大きくなった。また、乾燥開始(材齢 14 日)から材齢 182 日までの収縮量(乾燥収縮量)は、いずれの含水状態においても封緘養生にくらべて水中養生の方が大き

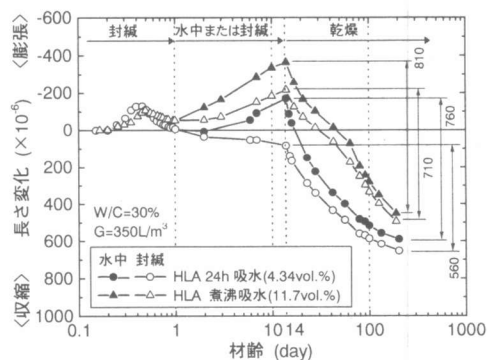


図-6 養生方法と長さ変化(HLA)

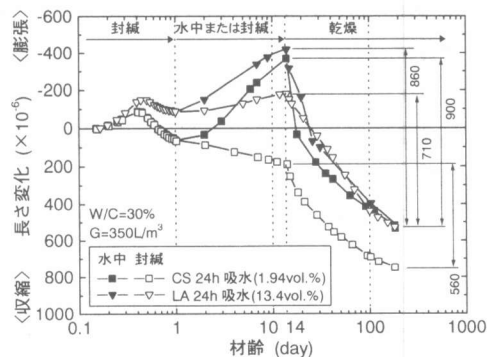


図-7 養生方法と長さ変化(CS, LA)

くなった。この水中養生によって乾燥収縮量が増大する割合は、粗骨材の含水率が低いほど大きい傾向を示した。なお、図-7 に示す粗骨材種類が異なる場合にも、養生方法と粗骨材含水率が長さ変化に与える影響は、図-6 の場合とまったく同様の傾向になっている。

図-8 は、HLA の含水状態を変化させて封緘養生ならびに水中養生したコンクリート供試体においてペースト部の細孔径分布を測定した結果である。なお、24 時間吸水した CS ならびに LA を用いた場合の細孔径分布の傾向は、それぞれ 24 時間吸水 HLA、煮沸吸水 HLA の場合とまったく同様となったため、ここでは図を割愛した。骨材が低含水状態の場合(24 時間吸水 HLA ならびに CS)は、封緘養生によって材齢 14 日まで組織が緻密化するものの、材齢 90 日の長期では封緘養生による細孔構造の変化は小さく、水中養生を材齢 14 日まで行なった場合にもっとも緻密化している。一方、骨材が含水率 10vol.% 程度以上の高含水状態になった場合(煮沸吸水 HLA ならびに 24 時間吸水 LA)は、封緘養生を行うことで材齢 90 日の長期にわたり組織の緻密化が継続し、材齢 14 日の細孔構造を比較したとき、封緘養生ならびに水中養生のいずれの養生によっても大きな違いはなかった。本実験のように水セメント比が小さいコンクリー

トの場合、水中養生を行っても水分が供試体表面から内部まで容易に供給されず、粗骨材の含水量が多いときには、逆にその粗骨材含水が養生水として作用しペースト組織を緻密化させたと考えられる。このため、水中養生を行っても細孔構造に変化が生じにくく、養生方法の違いによって収縮量が大きく変化しなかったものと推察される。一方、粗骨材の含水量が少ない場合には、図-3 ならびに図-4 に示した自己体積変化が収縮傾向を示すことでわかるように、封緘養生では粗骨材含水がペースト部に十分供給されず供試体内部は自己乾燥し、養生に必要な水分が不足してペースト組織が粗くなったと思われる。この場合、ペースト組織の形成は、供試体内部よりもむしろ外部からの水分補給に依存するようになり、低水セメント比の場合でも外部から水の浸入が促され、水中養生の場合に細孔組織がもっとも緻密化し、乾燥収縮が大きくなったと考えられる。

3.3 逸散水量と長さ変化の関係に及ぼす影響

各養生条件において 24 時間吸水ならびに煮沸吸水した HLA を用いた供試体の逸散水量(w)と長さ変化(ϵ)の関係をそれぞれ図-9 ならびに図-10 に示す。図には各供試体において乾燥期間の等しい点を結んだ曲線を併記した。なお、24 時間吸水した CS ならびに LA を用いた場合の $w-\epsilon$ 曲線は、それぞれ 24 時間吸水 HLA、煮沸吸水 HLA の場合と同様の傾向となったため、ここでは図を割愛した。図-9 のように粗骨材を低含水状態で用いた場合(24 時間吸水 HLA ならびに CS)は、封緘養生の期間を 14 日間から 1 日間に短縮することで、 $w-\epsilon$ 曲線は横軸の正方向へ移動した。養生期間が短いときには、ペースト部に未水和の粗大な空隙が増加し、この粗大空隙中の水は乾燥の初期に逸散するが大きな毛細管張力を発生しないため収縮に寄与しないと考えられる。そのため、乾燥期間 3 日程度の初期まで $w-\epsilon$ 曲線の傾きが緩やかになり、 w と ϵ の関係は非線形になって横軸正方向の移動量が増加する。また、同一養生期間で養

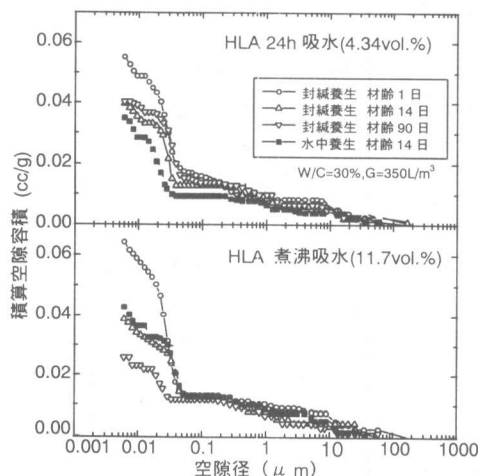


図-8 養生の種類による細孔径分布の変化

生方法を封緘養生から水中養生にした場合、 $w-\varepsilon$ 曲線は横軸負方向へ移動し、これは低含水状態の粗骨材を用いたとき、外部からの水分供給によって細孔がさらに微細なものになったことを示唆している。図-10 に示した含水率 10vol.% 程度以上となる高含水状態の粗骨材の場合(煮沸吸水 HLA ならびに 24 時間吸水 LA)は、すべての $w-\varepsilon$ 曲線が図-9 よりも横軸の正方向に大きく平行移動した。この移動は、粗骨材含水量の増加が引き起こしたもので、乾燥の初期段階でペーストの細孔よりも粗大な空隙を有する粗骨材中の水分が収縮を起こすことなく逸散したために生じたものと考えられる。また、高含水骨材の場合、封緘養生の期間が短くなると $w-\varepsilon$ 曲線は横軸正方向へ移動するものの、その移動量は図-9 にくらべて非常に小さいものであった。また、水中養生した場合の曲線は、封緘養生した場合と一致し、上述したような曲線の平行移動は生じなかった。

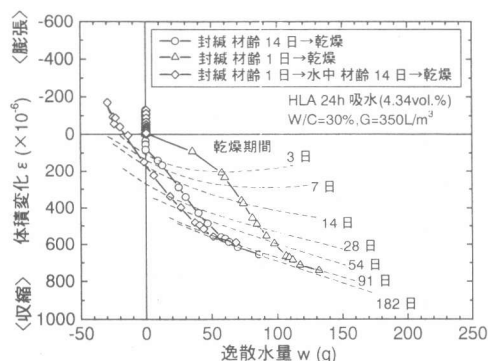


図-9 $w-\varepsilon$ 曲線の変化(24 時間吸水 HLA)

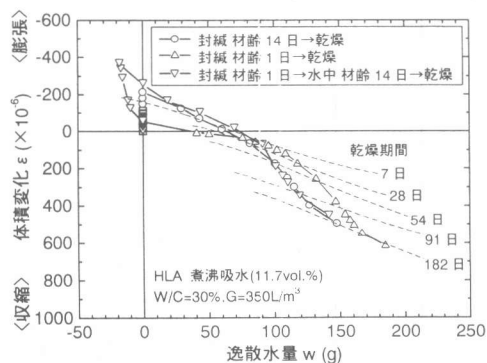


図-10 $w-\varepsilon$ 曲線の変化(煮沸吸水 HLA)

以上より、粗骨材が高含水状態になった場合、本実験で行った養生条件の範囲内ではほぼ一定の $w-\varepsilon$ 曲線となり、養生が収縮機構に及ぼす影響は小さいが、低含水状態の場合は養生条件によって $w-\varepsilon$ 曲線に変化を生じ、養生が収縮機構に与える影響が大きいことが考察される。

4. まとめ

本研究で得られた結論をまとめると、以下のとおりである。

- (1) 短期間の封緘養生を行った場合、普通骨材や低含水状態の軽量骨材を用いたコンクリートでは、ペーストの細孔構造が比較的緻密であるため乾燥収縮は増加するものの、封緘養生期間を長くすることで大幅に低減される。
- (2) 高含水状態の軽量骨材を用いたコンクリートの場合、養生期間を長くしても乾燥収縮はほとんど低減されない。これは長期養生となることで骨材中の水が養生水として利用されてペーストが緻密化し、乾燥時に大きな毛細管張力が発生するためと考えられる。
- (3) 普通骨材ならびに軽量骨材のいずれも、封緘養生より水中養生を行った方が乾燥収縮は増加する傾向を示す。この傾向は、骨材が低含水状態であるほど水中養生によって緻密なペースト組織となりやすいために顕著となる。

参考文献

- 1) 例えば、河井徹ほか：締固め不要・高強度軽量コンクリートの開発と適用、セメント・コンクリート、No.552、1993.2
- 2) 岡本享久ほか：高性能軽量コンクリート、コンクリート工学、Vol.37、No.4、pp.12-18、1999.4
- 3) 橘大介ほか：高品質人工軽量骨材が軽量コンクリートの物性改善に及ぼす効果、土木学会論文集、No.496、V-24、pp.89-98、1994.8
- 4) 河野克哉ほか：超軽量骨材を用いたコンクリートの自己収縮ならびに乾燥収縮、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.20、No.2、pp.43-48、1998.6