

論文 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

河野 克哉*1・岡本 享久*2・柴田 辰正*3・石川 雄康*4

要旨: 本研究は、従来の膨張頁岩などを原料とする軽量骨材にくらべて吸水特性ならびに強度特性に優れる超軽量骨材を粗骨材に用いたコンクリートの自己収縮ならびに乾燥収縮機構について検討したものである。超軽量骨材を用いたコンクリートは、従来型の軽量骨材にくらべて吸水率が小さいため普通骨材に近い収縮性状を示した。しかし、粗骨材の含水率ならびに絶対容積が増加するほど、自己収縮はペースト部への水分補給量の増加で小さくなり、乾燥収縮は逸散水量の増加で大きくなる。これは、供試体中の粗骨材の含水量が多いほど、水中養生中に自己乾燥の影響を受け難く、ペースト部に微細な空隙が形成されるためと考えられる。

キーワード: 超軽量骨材, 含水率, 骨材絶対容積, 自己収縮, 自己膨張, 自己乾燥, 乾燥収縮

1. はじめに

超軽量骨材とは、従来の膨張頁岩などを原料にした非造粒型ならびに造粒型の軽量骨材にくらべて吸水性が非常に低く、かつ強度特性に優れた高品質人工軽量骨材のことをいい、必ずしも骨材比重が小さいことを意味していない。一般に、このような特長は流紋岩系の鉱物を主原料とする回転造粒型の軽量骨材が有している¹⁾²⁾。本研究で使用した超軽量骨材は、微粉碎した真珠岩(流紋岩の一種)に可塑性、発泡剤などを添加した混合原料を回転造粒機により高密度造粒し、中温焼成で焼結させた後、さらに高温焼成で発泡させて製造したものである。この製造方法により、骨材中に微細な閉気孔を形成させることが可能となり、水の浸透が非常に少ない、低吸水性の骨材となっている¹⁾。

一般に、軽量骨材は、製造過程における加熱骨材の放水冷却による吸水、貯蔵時の乾燥、プレウエッティングによる吸水、練混ぜならびに運搬時の吸水、ポンプ圧送による圧力吸水などの影響を受けて含水状態が変化しやすく、この含水状態の変化がコンクリートの性状に大きな影響を与えている。これまで、超軽量骨材は低吸水性であるた

め、コンクリートのフレッシュ性状や凍結融解抵抗性を改善できることは明らかになっているものの²⁾、収縮特性に与える影響については十分に議論されていない。本研究では、超軽量骨材を粗骨材に用いたコンクリートにおいて、市販の非造粒型軽量骨材ならびに普通骨材といった吸水特性の異なる骨材を用いた場合と比較することで、その自己収縮ならびに乾燥収縮の機構を考察した。また、超軽量骨材の含水状態ならびに絶対容積とコンクリートの収縮特性の関係についても考察した。

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。結合材には早強ポルトランドセメントを用いた。細骨材には青梅産砕砂を、粗骨材には前述した超軽量骨材、膨張頁岩を原料とする市販の非造粒型軽量骨材、および青梅産砕石の3種類を用いた。なお、超軽量骨材においては、絶乾比重が1.2ならびに0.9程度となるように焼成された2種類の骨材を使用した。また、混和剤には高性能AE減水剤ならびにAE助剤を使用した。

*1 日本セメント(株) 中央研究所 建材研究部 研究員 工修 (正会員)

*2 日本セメント(株) 中央研究所 建材研究部 主席研究員 工博 (正会員)

*3 日本セメント(株) 中央研究所 建材研究部 副主任研究員 工修 (正会員)

*4 日本セメント(株) 中央研究所 建材研究部 主任研究員 工修 (正会員)

表 1 使用材料

(a) 結合材, 細骨材, 混和剤

使用材料	種類	記号	物性または成分
結合材	早強ポルトランドセメント	C	比重: 3.15, 比表面積: 4490cm ² /g
細骨材	青梅産砕砂	S	表乾比重: 2.62, 吸水率: 1.63%/wt., 粗粒率: 3.07
混和剤	高性能 AE 減水剤	SP	主成分: ポリカルボン酸エーテル系複合体
	AE 助剤	AE	主成分: 変性アルキルカルボン酸化合物

(b) 粗骨材

種類	原料	記号	絶乾 比重	表乾 比重*1	24h 吸水率*1		煮沸吸水率*2		最大寸法 (mm)	粗粒率
					(%/wt.)	(%/vl.)	(%/wt.)	(%/vl.)		
超軽量骨材 (回転造粒型軽量骨材)	真珠岩	HAL1	1.17	1.21	3.78	4.42	8.26	9.67	15	6.47
		HAL2	0.94	0.99	5.10	4.79	9.26	8.70	15	6.48
非造粒型軽量骨材	膨張頁岩	AL	1.27	1.49	17.6	22.3	27.9	35.4	15	6.40
青梅産砕石	—	CS	2.62	2.64	0.74	1.94	—	—	15	6.51

*1 絶乾状態の骨材を静水中に 24 時間浸漬して表乾状態にしたときの比重ならびに含水率

*2 絶乾状態の骨材を 2 時間煮沸して表乾状態にしたときの含水率

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固定、すなわち単位ペースト量を一定とし、W/C=32%とした。一方、粗骨材の種類、含水率(含水状態)ならびに単位量については、表に示すように変化させた。なお、コンクリートのスランプならびに空気量は、混和剤の添加量で調整し、それぞれ 15±3cm, 5.0±1.0%の範囲とした。

2.3 練混ぜ方法

セメント、細骨材および粗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 秒間練り混ぜた(計 120 秒間)。

2.4 自己収縮ひずみの測定

(1) 材齢 24h 以前の測定方法

図 1 に示すように型枠(10×10×40cm)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℃恒温室に静置した。測長は、始発時間に達した時点から、供試体中心部に取付けた埋込みゲージ(弾性係数: 39MPa, 標点距離: 100mm)にて行った。ただし、始発時間は同一バッチの試料を 5mm ふるいでふるって粗骨材粒を除去したモルタルにおいてプロクター貫入抵抗試験を行い算出した。なお、自己収縮ひずみの算出に当って

は、供試体中心部に取付けた熱電対にて水和熱による温度上昇を測定し、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。

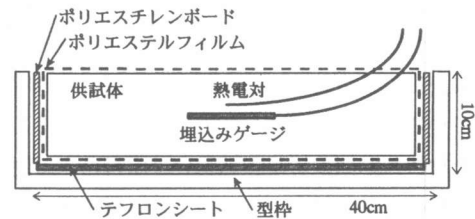


図 1 自己収縮ひずみの測定方法

(2) 材齢 24h 以降の測定方法

上記の試験が終了後、直ちに脱型し、供試体全面をアルミ粘着テープでシールして 20℃恒温室に静置し、所定材齢で供試体の長さ変化ならびに質量変化を測定した。なお、測定期間を通じた供試体の質量変化率はすべて±0.01%の範囲であり、外部からの水分浸入ならびに供試体からの水分逸散による長さ変化は、ほとんど生じなかったものと考えられる。

2.5 乾燥収縮ひずみの測定

(1) 養生ならびに乾燥方法

供試体(10×10×40cm)は、材齢 1d で脱型し、材齢 14d まで水中養生(20℃)した後、恒温恒湿室(20℃, 60%R.H.)にて乾燥させた。

(2) 測長方法

養生が終了した時点を基長とし、供試体両端部

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							
	粗骨材 G			W/C (%)	単位水量 W (kg/m ³)	s/a (%)	Slump (cm)	Air (%)	単位容積質量 (kg/m ³)	圧縮強度 水中 28d (MPa)	弾性係数 水中 28d (GPa)	
	種類	含水率 Q(%v/v)	含水状態									単位量 (L/m ³)
1	HAL1	4.42	24h 吸水	320	32	166	48.2	12	5.6	1834	60.1	21.8
2				380			38.5	18	4.4	1770	59.9	22.3
3		0.00	絶対乾燥	350			43.3	12.5	5.2	1801	61.1	22.1
4							18	4.6	1796	60.8	21.8	
5							12	4.8	1817	59.7	22.9	
6	HAL2	4.79	24h 吸水	350			43.3	14	5.7	1705	53.3	20.3
7	AL	22.3	24h 吸水	350			43.3	17	5.5	1907	61.3	20.9
8		0.00	絶対乾燥				15.5	4.6	1830	63.1	23.0	
9		35.4	煮沸吸水				18	4.9	1901	57.9	20.6	
10	CS	1.94	24h 吸水	350			43.3	12.5	4.1	2343	82.0	33.9

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、供試体表面からの逸散水量を算出した。

3. 実験結果および考察

3.1 超軽量骨材コンクリートの自己収縮特性

(1) 粗骨材の種類が自己収縮に及ぼす影響

HAL1, HAL2, AL および CS を 24h 吸水状態で単位量 350L/m³ にて用いたコンクリートの自己収縮ひずみの経時変化を図 2 に示す。HAL1, HAL2 および CS を用いた場合には、凝結直後から自己収縮を生じ、その後、長期にわたり自己収縮が継続している。材齢 60d における自己収縮ひずみは、HAL1 ならびに HAL2 の場合で両方とも 280×10^{-6} 程度、CS の場合で 420×10^{-6} 程度となり、CS にくらべて HAL を用いたコンクリートの自己収縮は小さいことがわかった。このことは、いずれの供試体にも外部から水の供給がないことを勘案すると、水の供給源は粗骨材中の含水であると推察でき、粗骨材による含水量の違いが自己収縮量に変化を与えていると考えられる。すなわち、セメントの水和反応にともなう空隙の形成ならびに間隙水の消費が生じて、CS よりも含水量の多い HAL の方が空隙内へ水が浸透しやすく、空隙内における湿度の低下割合が小さいため自己収縮の駆動力となる空隙内の圧力差を生じにくいことと思われる。一方、AL を用いた場合には、HAL ならびに CS とは対照的に凝結直後から自己膨張を

生じており、材齢 1d 以降ではその膨張ひずみを残留したままで、大きな長さ変化を生じていない。これは、AL の含水量が他の粗骨材にくらべてきわめて多いため、常に粗骨材中の含水が空隙内へ十分に補給されて自己乾燥状態とならず、湿潤膨張したものと考えられる。

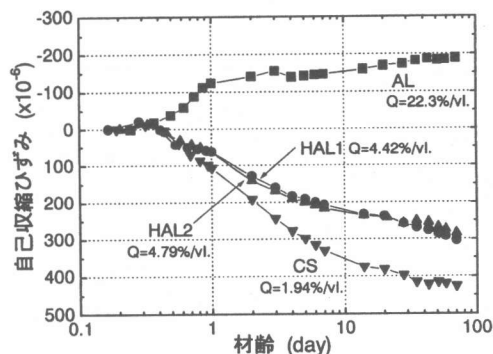


図 2 粗骨材の種類の影響

(2) 粗骨材の含水状態が自己収縮に及ぼす影響

HAL1 ならびに AL を絶対乾燥、24h 吸水状態および煮沸吸水状態で単位量 350L/m³ にて用いたコンクリートの自己収縮ひずみの経時変化を図 3 に示す。HAL1 を絶対乾燥で用いた場合は、粗骨材からの水分供給がないために、24h 吸水状態の場合にくらべ凝結直後から急激な自己収縮を生じ、この初期に生じたひずみの差がそのまま長期にわたり継続する傾向を示した。また、蒸気圧を利用して強制的に吸水させた、すなわち煮沸吸水状態の HAL1 では、粗骨材からの水分補給により、材

齡初期と水和反応が緩慢になる材齡 10d 以降に若干の膨張を起こすものの、他の含水状態の場合とくらべて大きな自己体積変化を生じていない。一方、AL を用いたコンクリートでは、いずれの含水状態の場合でも凝結直後から材齡 1d まで膨張する傾向を示した。とくに、AL は含水がないと思われる絶乾状態で用いた場合でも材齡初期に自己膨張を生じる点が、HAL1 の場合と大きく異なっている。これは、図 4 に示した各粗骨材の浸水時間と吸水率の関係から、絶乾状態で練り混ぜた場合、自己収縮の測定開始(始発時点)までに HAL1 は練混ぜ水を比較的吸水しにくいのに対し、AL は練混ぜ水を直接吸水し、HAL1 にくらべて多量な含水を生じた状態になってしまったためと考えられる。また、AL は、材齡 1d 以降において、24h 吸水状態ならびに煮沸吸水状態の場合、大きな長さ変化を生じないが、絶乾状態の場合には収縮傾向に転じ、材齡 60d では 80×10^{-6} 程度の自己収縮

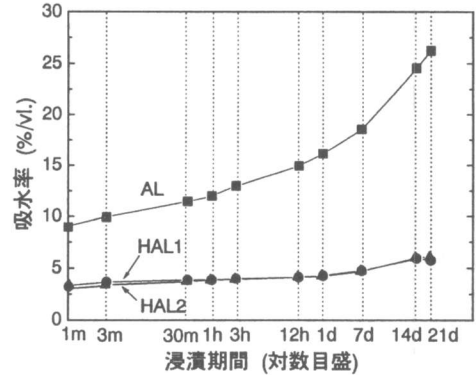


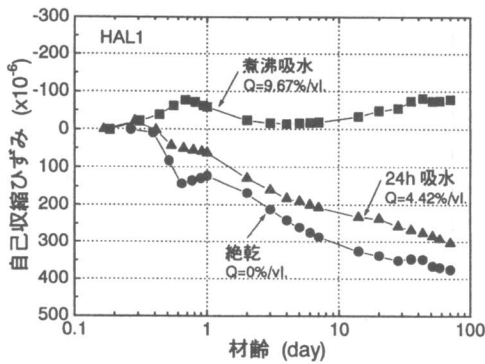
図 4 水に浸漬した粗骨材の吸水率の経時変化

ひずみが発生した。

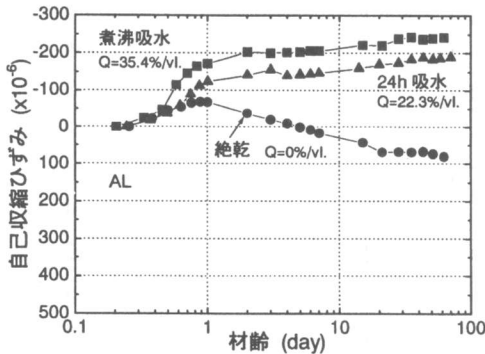
以上より、HAL1 および AL などの軽量骨材を用いたコンクリートの自己収縮には、粗骨材中の含水が大きく関与しており、粗骨材中の含水が多少いほど自己収縮が発生しにくいことがわかった。

(3) 粗骨材の絶対容積が自己収縮に及ぼす影響

24h 吸水状態の HAL1 を単位量 $320, 350, 380\text{L/m}^3$ にて用いたコンクリートの自己収縮ひずみの経時変化を図 5 に示す。単位量 320L/m^3 の場合、凝結直後から自己収縮を生じるが、単位量 350L/m^3 ならびに 380L/m^3 の場合は凝結直後に若干の自己膨張を生じ、自己収縮の発生時期はそれぞれ材齡 0.4d(約 10h), 材齡 1d 以降であった。このように、HAL1 を用いたコンクリートにおいて、粗骨材が同一の含水状態であれば絶対容積が少ないほど粗骨材からペースト部への水分補給が減少するため、自己収縮は早期に生じる傾向がある。



(a) HAL1 を用いたコンクリート



(b) AL を用いたコンクリート

図 3 粗骨材の含水状態の影響

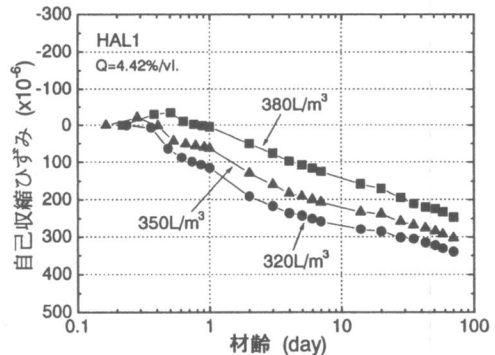


図 5 粗骨材の絶対容積の影響

3.2 超軽量骨材コンクリートの乾燥収縮特性

(1) 粗骨材の種類が乾燥収縮に及ぼす影響

HAL1, HAL2, AL および CS を 24h 吸水状態で単位量 $350\text{L}/\text{m}^3$ にて用いたコンクリートの逸散水量と乾燥収縮ひずみの関係を図 6 に示す。なお、各供試体において乾燥期間の等しい点を結んだ曲線(以下、乾燥材齢曲線とよぶ)を併記した。既往の研究で軽量骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみは逸散水量と相関性があるといわれており³⁾、本実験で用いた CS, HAL1 ならびに HAL2 の場合は線形関係となり、AL の場合は非線形関係となった。AL の場合、乾燥期間 1d に 10×10^{-6} 程度の膨張を生じたが、これは図 2 に示した自己膨張と同じ原理で、供試体が有する空隙の中で比較的粗大と考えられる粗骨材の空隙からペースト部へ水分供給された(換言すると、供試体からの水分逸散は、はじめに粗骨材中の粗大空隙、つづいて微細空隙から生じ、その後はペースト部の細孔へと移行する)ことを示すものである。1d 以後は、粗骨材からの水分供給が徐々に減少してペースト部の収縮量が増すため、線形関係にならないと思われる。一方、AL 以外の骨材では粗骨材中の含水量が少なく、ごく初期に消費され、粗骨材中の含水量の影響が小さく線形関係を示すものと推察できる。したがって、粗骨材中の含水量が少ないほど逸散水量-ひずみ直線(または曲線)は図の左下に、含水量が多いほど図の右上に位置することになる。ここで、乾燥材齢曲線に着目すると、同一期間における逸散水量(乾燥速度)が AL と他の骨材の場

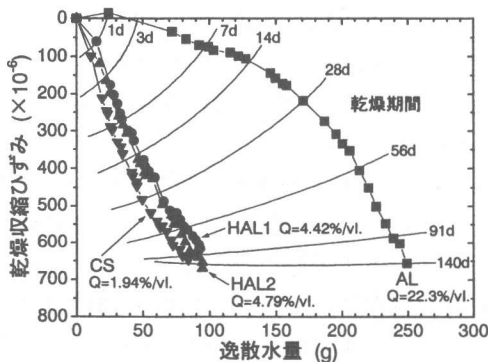


図 6 粗骨材の種類の影響

合で異なっていることがわかる。また、乾燥材齢曲線の傾きは乾燥期間が経過するほど徐々に水平に近づき、乾燥期間 140d の乾燥収縮ひずみはいずれの供試体も 650×10^{-6} 程度となったが、長期では、乾燥材齢曲線の傾きが右下がりとなり、AL, HAL, CS の順で、すなわち含水量の多い骨材ほどひずみが増大すると思われる。

(2) 粗骨材の含水状態が乾燥収縮に及ぼす影響

HAL1 を絶乾状態, 24h 吸水状態および煮沸吸水状態で単位量 $350\text{L}/\text{m}^3$ にて用いたコンクリートの逸散水量と乾燥収縮ひずみの関係を図 7 に示す。これより、同一の粗骨材でも含水量が変化すると逸散水量-ひずみ直線の傾きも変化し、24h 吸水状態とくらべて絶乾状態では図の左下に、煮沸吸水状態では図の右上に位置することがわかる。また、乾燥材齢曲線は、14d でほぼ水平となり、いずれの供試体の乾燥収縮ひずみも同程度となるが、乾燥期間の経過とともに乾燥材齢曲線は右下がりとなり、乾燥期間 140d では粗骨材の含水量が多いものほど乾燥収縮量は増加した。この傾向は、図 3(a) に示した自己収縮の場合とはまったく逆の傾向となっている。乾燥収縮試験を行った供試体は、材齢 14d まで水中養生しているが、田澤らは本実験のように W/C が小さく断面寸法が大きい場合、ごく表層部が水で充填されるのみで内部まで水は供給されないと述べている⁴⁾⁵⁾。したがって、水中養生期間中も供試体内部は、自己収縮機構が適用できる状態、つまり、絶乾骨材、つづいて 24h 吸水骨材の順で自己乾燥し、煮沸吸水骨材では湿潤状

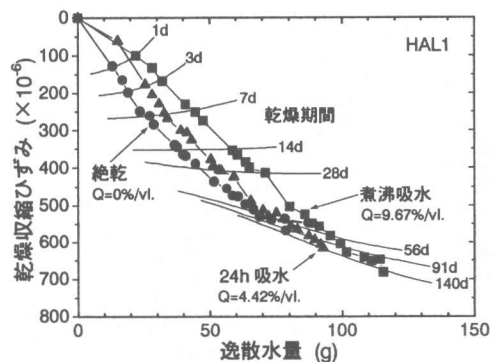


図 7 粗骨材の含水状態の影響

態となっている。そのため、内部が湿潤状態である(換言すれば、自己収縮が小さい)ものほど、ペースト部は水和反応で微細な空隙が形成されやすく、供試体が乾燥を受けて空隙にメニスカスを生じた際、大きな毛細管張力を生じるため、乾燥収縮量が増大したものと考えられる。

(3) 粗骨材の絶対容積が乾燥収縮に及ぼす影響

24h 吸水状態の HAL1 を単位量 320, 350, 380L/m³ にて用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみと逸散水量の関係を図 8 に示す。粗骨材絶対容積の変化による逸散水量-ひずみ直線の傾きの変動は、図 7 の場合にくらべて小さい。これは、コンクリート 1m³ 当たりに含まれる粗骨材の含水量を比較したとき、含水状態の違いでは約 0 から 33.8L までの変化を与えられるが、絶対容積の違いでは適当な細骨材率の範囲内で約 14.1 から 16.8L ほどの変化しか与えられなかったためである。そのため、乾燥材齢曲線の傾きの経時変化は、図 7 の場合にくらべてきわめて緩慢であり、鉛直方向にほぼ並列している。このことは、どの供試体も同一乾燥期間で逸散水量が同等、すなわち乾燥速度が一定であることを示すものである。そのため、粗骨材絶対容積が多い、換言すれば、供試体に含まれる粗骨材の含水量が多いほど長期間にわたり水分を保持でき、乾燥期間 140d までの乾燥収縮ひずみは小さくなったと考えられる。しかし、粗骨材絶対容積が多いものは、最終的に逸散し得る水量が多いこと、また、前節で述べたように水中養生中に自己乾燥の影響を受け難いためペースト部において

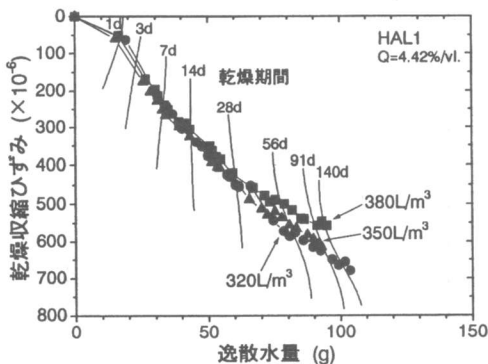


図 8 粗骨材の絶対容積の影響

微細空隙が形成されやすいことなどを考えると、今後、乾燥収縮量は増大するものと推察される。

4. まとめ

本研究より、超軽量骨材を粗骨材に用いたコンクリートの収縮特性について明らかになったことをまとめると以下のとおりである。

- (1) 24h 吸水状態で用いた場合、従来型の軽量骨材より非常に吸水率が小さいため、自己収縮ならびに乾燥収縮とも普通骨材に近い性状を示す。
- (2) 自己収縮は、粗骨材の含水量ならびに絶対容積が増加するほど、ペースト部への水分補給量の増加によって小さくなる。
- (3) 自己収縮の傾向と考え合わせると、乾燥収縮は、粗骨材の含水量ならびに絶対容積が増加するほど、養生中に自己乾燥の影響を受けにくいいため微細構造が発達し、メニスカスが生じた際の毛細管張力の増大によって大きくなる。

[謝辞]

本研究の実施に当たって、東海大学工学部土木工学科卒論生の中村達夫君、日本大学理工学部交通土木工学科卒論生の出口鋭君にご協力頂いた。ここに記して深謝致します。

[参考文献]

- 1) 岡本享久ほか：超軽量コンクリート，コンクリート工学，Vol.36，No.1，pp.48-52，1998.1
- 2) 橋大介ほか：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
- 3) 西林新蔵ほか：コンクリートの乾燥収縮の内部機構に関する一考察，材料，Vol.22，No.232，pp.52-56，1973.1
- 4) 田澤栄一ほか：水中養生中に生じるセメントペーストの自己乾燥，第 43 回土木学会中国四国支部研究発表会講演概要集，pp.570-571，1991.5
- 5) 宮澤伸吾ほか：湿潤養生中における高強度コンクリートの体積変化，土木学会第 50 回年次学術講演会第 5 部，pp.680-681，1995.9