

乾湿に伴う骨材の体積変化

VOLUMETRIC CHANGE OF AGGREGATES BY ABSORPTION
AND DRYING

後藤 幸正*・藤原 忠司**

By Yukimasa GOTO and Tadashi FUJIWARA

1. 結 論

乾湿に伴うコンクリートの体積変化を問題にする場合、セメントペーストに重点が置かれ、骨材については看過されてきた感が強い。たしかに、ペーストの体積変化がコンクリートより大きいことは骨材よりペーストの体積変化の方が卓越していることを意味し、ペーストに着目することの有意性が認められる。しかしながら、いまかりに骨材の種類だけが異なり、他の条件が全く同一のコンクリート間の体積変化に関する挙動に相違が生じたとすれば、骨材の性質を無視してその原因を説明することは不可能であろう。そして、この問題は単に仮説にとどまらず、現実に存在する。乾燥に伴う軽量コンクリートの次のような問題もその例と考えられる。

骨材自体の弾性係数および吸水量などを考慮に入れると、軽量コンクリートの乾燥収縮の最終値は普通コンクリートに比べて大きいことが予想される。ところが、実測すると結果は逆という報告が少なくない¹⁾。筆者らも容積配合をまったく同一にして比較実験を行ったところ、軽量コンクリートの方が小さな収縮を示した²⁾。この予測に反した現象についての適格な説明が現在のところなされていない。この原因を説明するためには骨材自体の体積変化を知る必要のあることは明らかである。

また、乾燥過程で軽量コンクリートの引張および曲げ強度が著しく低下するという衆知の現象³⁾についても、現段階ではその原因が正しく把握されているとはいえない。筆者らの実験によると⁴⁾、強度低下は普通コンクリートにも見受けられる現象であるが、軽量コンクリートに比較してその程度が小さいのは両骨材間の挙動に相違が存在するためと思われる。

このように、これらの問題に限っていえば、骨材自体

の性質がよく理解されていないため統一の見解が確立していないと考えられ、問題解決には骨材粒そのものに着目した基礎的な研究が望まれる。

本研究は以上の観点のもとに、乾湿に伴う骨材の体積変化を明らかにすることを目的とした。

2. 実験概要

(1) 体積変化測定方法

従来この種の実験が欠落していたことの理由のひとつとして、体積変化測定方法の技術的難しさが挙げられる。すなわち、体積変化測定用試料としての骨材には形態的に不利な条件が多く、所期の目的を達成するにはこれらの条件を克服した測定方法の確立が先決となる。本実験では試行錯誤を繰り返して次に述べる3つの測定方法を考案し、比較検討して相互の信頼性を確かめることにした。

a) 電気抵抗線ひずみゲージを用いる方法⁵⁾

Photo. 1 に示すように、骨材粒の円周上に抵抗線ゲージを貼付し、円周ひずみを測定して体積変化を推定する方法である。この方法の最大の問題点は試料を水中浸漬するため、ゲージの防湿を完全にすることがあること

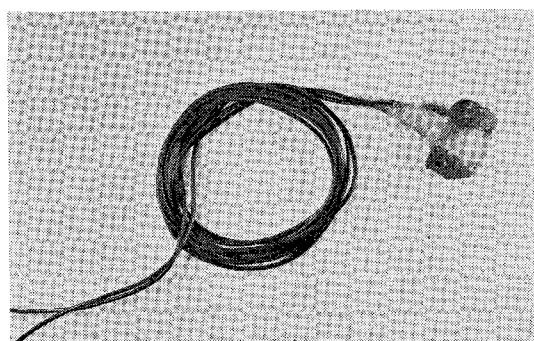


Photo. 1 Method by electric wire strain gauge.

* 正会員 工博 東北大学教授 工学部土木工学科

** 正会員 工修 岩手大学助手 工学部土木工学科

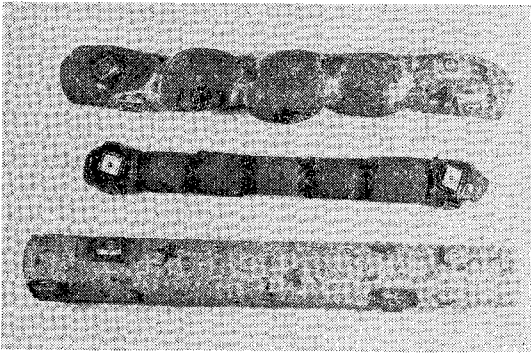


Photo. 2 Method by contact type dial gauge.

であろう。特に骨材のように吸水性の試料の場合、ゲージ表面のみならず、裏面からの吸湿にも注意を要する。試料作製に際してはこの点を十分留意し、万全を期した。

b) コンタクトタイプダイヤルゲージを用いる方法

コンタクトゲージを用いて骨材の長さ変化を測定し、体積変化を推定する方法である。骨材1個だけではゲージ長が過小であるため、Photo. 2 に示すように骨材を数個連結してゲージ長を10 cmとした。また、測定用のポイントは4面に貼付し、その平均値で試料の長さ変化を表わすことにした。この方法は機械的測定方法であるから、吸湿の影響を受けない点で電気的な測定方法より優れている。ただし、試料が細長であるため、吸水および乾燥に伴いその生ずる恐れがある。この点に関しては別途に実験を行い確かめたところ、いくぶんのそり

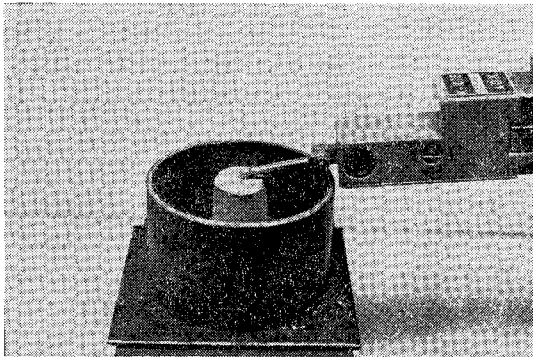


Photo. 3 Method by electronic micrometer.

は発生するが長さ変化の値にはほとんど影響しない程度であることが認められた。

c) 変位計（電子マイクロメーター）を用いる方法

Photo. 3 に示すように、変位計を用いて骨材の長さ変化を測定する方法である。これも抵抗線ゲージと同様に電気抵抗の変化を利用する方法であるが、検出部が湿潤しても抵抗値に影響をおよぼさないため、この点に関してはより優れた方法といえる。ただし、振動に対しては非常に敏感であるため、この点は十分注意をして測定を行った。

(2) 含水量変化測定方法

コンタクトゲージによる方法の場合は試料の重量変化を直接測定することによって含水量の変化を知ることができたが、抵抗線ゲージおよび変位計による方法の場合は直接測定することが不可能なため、試料と同じ吸水面積をもつ試料を別に作製し、この試料を長さ変化測定用試料と同じ環境のもとに置いて含水量の変化を測定した。測定には感量1 mgの直示天びんを用いた。

(3) 使用材料

普通骨材としては岩手県雫石川および宮城県白石川産出の川砂利を用いた。川砂利は同一河川産でも石質の違いにより体積変化の値に差が生ずると予想されたため、石質別に分類して使用した。この石質の違いによる影響をさらに確認するため、岩手県産の石材からコア（φ15 mmの円柱）を採取し、これを用いての測定もあわせて行った。

軽量骨材は現在市販されている人工軽量粗骨材造粒型M、非造粒型Mおよび造粒型Bの計3種類を用いた。

以上の使用材料の物理的諸性質をTable 1に示す。

これらの骨材の特性をよりいっそう明らかにするため、普通ポルトランドセメント（O社製）を用いたペースト（φ15 mm円柱）についての測定も行った。

(4) その他

体積変化は温度変化によっても生ずるため、測定はすべて恒温室で行った。また、本実験ではBET法による

Table 1 Physical properties of used materials.

Materials	Normal aggregate		Lightweight aggregate			Stone		
	Shizukuishi	Shiroishi	Pelletized type M	Coated type M	Pelletized type B	Marble	Andesite	Sandstone
ρ_0	2.49	2.60	1.20	1.15	1.19	2.71	2.59	2.52
ρ	2.57	2.62	1.29	1.26	1.21	2.72	2.67	2.57
w	3.2	0.8	8.1	9.6	1.3	0.2	2.9	1.9

ρ_0 : specific gravity under oven dry condition.

ρ : specific gravity of saturated surface dry aggregate.

w : water absorption (%)

比表面積の測定および水銀圧入法による細孔径分布の測定なども行ったが、これらはすべて一般に用いられている方法に従った。

3. 実験結果および考察

(1) 体積変化測定方法の検討

抵抗線ゲージ法では円周ひずみを、コンタクトゲージ法および変位計法では長さ方向のひずみを測定したが、次に示すように両ひずみは同一になるはずである。

$$\text{円周ひずみ } \epsilon_1 = \frac{2\pi(r+dr) - 2\pi r}{2\pi r} = \frac{dr}{r}$$

$$\text{長さ方向ひずみ } \epsilon_2 = \frac{(l+dl) - l}{l} = \frac{dl}{l}$$

素材が同じでかつ含水量が等しければ

$$\frac{dr}{r} = \frac{dl}{l} \therefore \epsilon_1 = \epsilon_2 \dots \dots \dots (1)$$

上記3測定方法を比較するため、一例として絶乾状態の造粒型 M をいったん湿度 70% の空中置いてから 24 時間水中浸漬し、そのち再び湿度 70% の空中に放置した場合の水中浸漬開始時点からのひずみの経時変化を Fig. 1 に示す。

水中で膨張し、乾燥すれば収縮する傾向は三者とも全く同一であり、どの方法を用いても体積変化の傾向を定性的に把握できることが認められる。絶対値で比較すると、吸水面積が小さく、したがって含水量の変化が小さい抵抗線ゲージによる測定値が他二者に比べて大きなひずみを示しており、また乾燥長時間を経てもひずみが残留している。このような式 (1) に適合しない結果が生じた原因としては万全を期したはずの防湿効果になお難点があったためと考えられ、抵抗線ゲージによる測定値の信頼性はいくぶん劣っていると考えるのが妥当である

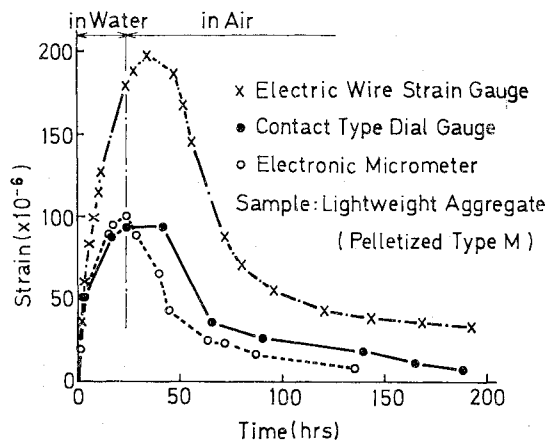


Fig. 1 Comparison of three methods for measurement of volumetric change.

う。

変位計の場合は一装置で1個の試料しか測定できず、この方法で多数の測定を行うには長期間を要するという難点が存在する。

このように、以上の2方法はそれぞれ特有の難点を有しているが、コンタクトゲージ法の場合はこれらの難点を克服しているように思われる。すなわち、この方法は前述したように機械的測定方法であり、しかも真ちゅう丸棒を数個連結して同様の測定を行ったところひずみを示さなかった事実から判断して吸湿による悪影響はほとんどないと考えてよく、また一測定機器で多数の測定が可能である。そこで、本実験では主としてコンタクトゲージを用いることとし、その測定結果は Fig. 1 の抵抗線ゲージおよび変位計による結果から信頼の置けるものであると考えることにした。以下の図表においては特に注釈のないかぎりコンタクトゲージによる測定値とする。

(2) 普通骨材の体積変化

絶乾状態の普通骨材を湿度 70% の空中に放置してから長時間水中浸漬した場合および 24 時間水中浸漬後再び湿度 70% の空中に放置した場合の水中浸漬直前を基準とした長さ変化と含水量変化とを測定した。Fig. 2 は

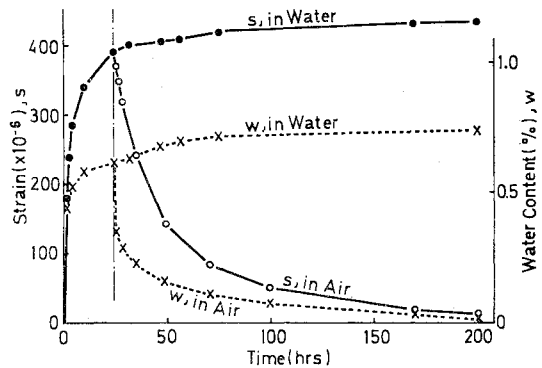


Fig. 2 Typical example for volumetric change of normal aggregate (granite from Shi-roishi riv.)

Table 2 Swelling strain by absorption for a long time ($\times 10^{-6}$).

1) Normal aggregate					
	Granite	Andesite	Rhyolite	Tuff	Shale
Shizukuishi	450	690	1 070	990	520
Shiroishi	450	960	460	1 200	—

3) Lightweight aggregate					
2) Stone					
Marble	Andesite	Sandstone	Pelletized type M	Coated Type M	Pelletized Type B
20	370	320	130	350	150

白石川産の花崗岩についての測定例である。

図より、水中で膨張し、乾燥すればほぼ浸漬前の体積にまで収縮することが認められる。また、ひずみの経時変化は含水量の経時変化とほぼ軌を同一にしており、いわば当然の現象といえるが、後述する軽量骨材と対比させると興味深い結果となっている。

他の石質の骨材もこの図とまったく同じ傾向の体積変化を示した。しかしながら、体積変化の絶対値に関しては石質の違いによる影響が顕著であった。Table 2 は長時間（約 1 600 時間）水中に浸漬したときの膨張ひずみを示しており、その影響の大きいことが認められる。一般に、普通骨材の物理的性質がその成因によって支配されることは明らかであり⁶⁾、体積変化の値を検討する場合にもまずその成因に着目するのが妥当であろう。表からすれば、本実験の範囲内では火成岩と堆積岩との体積変化の比較を一概に論ずることのできないような複雑な結果となっている。また、同じ火成岩であっても深成岩に属する花崗岩と火成岩（噴出岩）に属する安山岩、流紋岩の三者間には大きな違いが存在するなど統一的な傾向が見受けられない。したがって、普通骨材の体積変化の値に影響をおよぼす要因として単にその成因をとりあげるのとは不十分であり、成因に由来する何らかの共通の物理量を考える必要のあることが認められる。そして、その物理量としては吸水量をとりあげるのが一般的であろう。

Fig. 3 は 24 時間吸水時点での吸水量と膨張ひずみとの関係を各試料についてプロットしたものである。普通骨材の各石質の平均値を結ぶとほぼ直線となり、吸水量と体積変化とは近似的に比例関係にあることが認めら

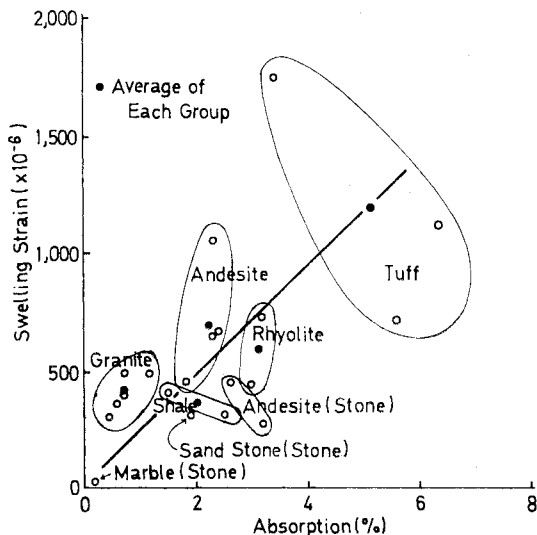


Fig. 3 Relation between absorption and swelling strain for normal aggregate and stone.

れる。ただし、各測定値のこの直線に対する偏差は大きく、特に凝灰岩の場合に著しい。凝灰岩はその成分である火山灰や火山砂の性質によって輝緑凝灰岩、流紋岩質凝灰岩、安山岩質凝灰岩などの区別があり、同じ凝灰岩とはいえ体積変化が多様性を示すのは当然といえよう。花崗岩の場合は各測定値が相互に接近しており、石質が比較的均一であることを示している。

次に、産地の違いに着目すると、Table 2 では白石川産の方がやや大きな体積変化を示している。しかし、実際問題として重要なのは各石質の混合割合であり、この割合を無視して総合的な判定を下すことはできない。測定用試料の作製に際し、石質別に分類せずまったく無作為に選定して測定を行ったところ、24 時間吸水時点の膨張ひずみは雫石川産で $350 \sim 800 \times 10^{-6}$ 、白石川産では $300 \sim 600 \times 10^{-6}$ の範囲内にあり、白石川産の方が総体的に小さな体積変化を示した。これは白石川産の場合、比較的体積変化の小さい花崗岩が過半数を占めていたためと思われる。

石材は骨材に比べて小さな体積変化を示している。たとえば、Fig. 3 で安山岩同士を比較してみると、石材の方が大きい吸水量を示しているにもかかわらず体積変化は小さい。河川砂利は上流地域に分布している岩石が風化、変質して運搬、堆積されたものであり、その過程で強度的に難点のある砂利は砂と化し、砂利の形をとどめるのは原石のうちでも強い部分といってもよい。したがって、石材より骨材の方が強度的に優れているのが一般的であろう。このように考えれば、強度の大きいものが体積変化が小さいとはかぎらず、強度と体積変化とは明りょうな相関関係が存在しないことになる。

以上の普通骨材および石材に関して得られた結果を総合すれば、体積変化の値に影響をおよぼす要因として成因、産地および強度をとりあげるにはそれぞれ難点があり、また吸水量は体積変化と近似的な比例関係にあるものの例外も存在し、統一的な要因とするには疑問が残ることになる。

(3) 軽量骨材の体積変化

上記普通骨材と同じ条件のもとで行った各種軽量骨材についての測定結果の一例を Fig. 4 に示す。長時間水中浸漬時の膨張ひずみは前掲の Table 2 に示しておいた。

水中で膨張し、乾燥すればほぼ元の体積にまで収縮する傾向は各品質に共通しており、三者を比較すると非造粒型の方が大きな体積変化となっている。また、乾燥初期の含水量変化と長さ変化との関係を詳細に調べると、両者の変化の仕方に時間的ずれの存在することが認められる。すなわち、含水量の急激な減少に比べ収縮は緩慢

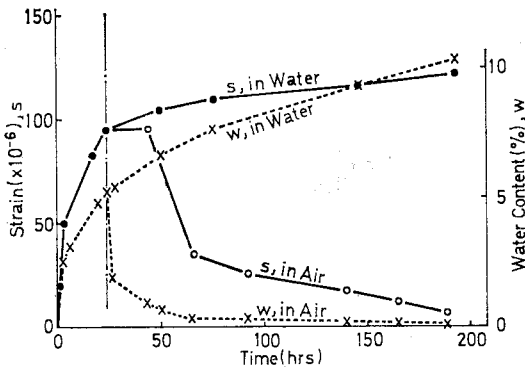


Fig. 4 Typical example for volumetric change of lightweight aggregate (pelletized type M).

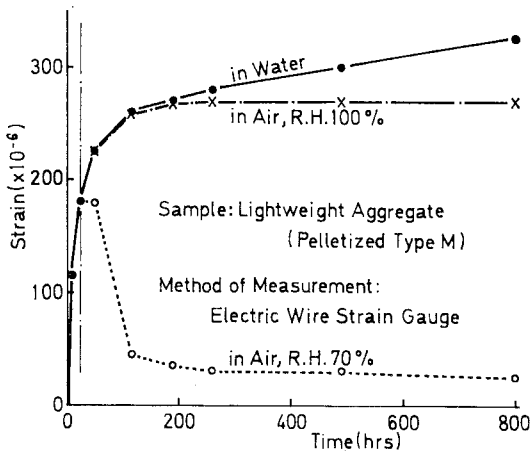


Fig. 5 Volumetric change of lightweight aggregate at various condition after absorption for 24 hours.

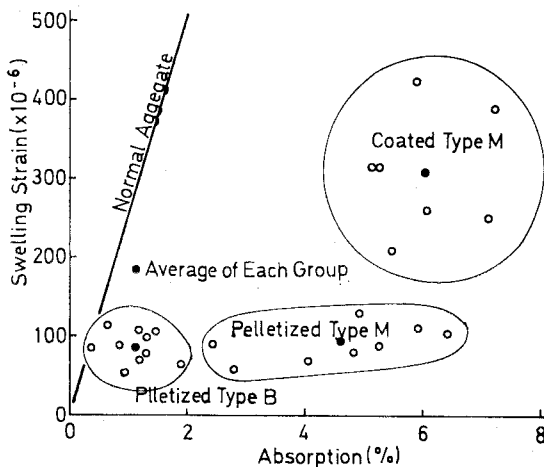


Fig. 6 Relation between absorption and swelling strain for lightweight aggregate.

である。抵抗線ゲージ法で 24 時間水中浸漬後の環境を 3 種類にして測定を行ったところ、Fig. 5 が得られた。図より、環境が霧室 (R.H. 100%) の場合、含水量がほぼ一定であるにもかかわらずかなりの時間水中浸漬と同様の膨張を継続し、のち体積はほぼ一定となっている。このように、ひずみの変化は含水量の変化と必ずしも軌を同一にしないことが認められ、この原因を説明するには骨材内部の細孔構造および内部での水分の移動過程などを明らかにする必要があると思われる。

軽量骨材について Fig. 3 と同様のプロットをしたのが Fig. 6 である。造粒型 B の各測定値は相互に接近し、品質の均一であることが推察されるのに対し、造粒型 M および非造粒型 M はばらつきの大きいのが特徴となっている。また、普通骨材に見られた吸水量と膨張ひずみとの近似的な比例関係がこの場合には成立しないと考えるのが妥当であろう。すなわち、吸水量の大きな試料がかならずしも大きな体積変化を示すとは限らない結果となっている。さらに、各品質の平均値を直線で結んだとしても、その勾配は普通骨材の直線とは大いに異なる。したがって、普通および軽量骨材の体積変化の値を吸水量で統一的に説明することは不可能であり、体積変化に影響をおよぼす要因として吸水量をとりあげるのは最適でないことがよりいっそう明らかになったといえる。

(4) ペーストの体積変化

コンクリートの体積変化に占める骨材の役割を明確にするため、ペーストについての同様の測定を行った。骨材との比較を厳密にするために試料は径 15 mm の円柱とし、骨材を用いた試料とほぼ同形とした。作製した試料を 1 週間水中養生 (20°C 恒温水槽) したのち、湿度

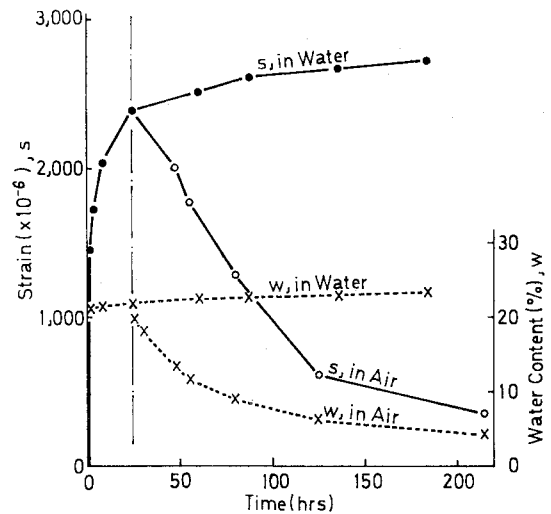


Fig. 7 Typical example for volumetric change of cement paste (W/C=50%).

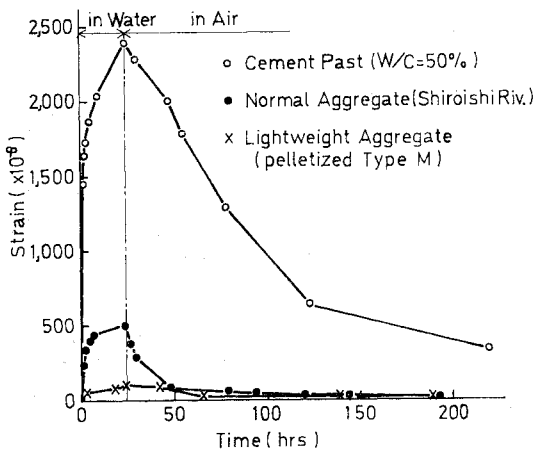


Fig. 8 Volumetric change of each material.

70%の恒温室で乾燥させ、収縮が緩慢になった時点で再び水中浸漬し、長時間水中および24時間水中浸漬後空中放置での体積変化を測定した。Fig. 7にはその一例としてW/C=50%のペーストのひずみと含水量の経時変化を示した。

ペーストの体積変化について述べるのは本文の趣意ではないので詳述しないが、図より、水中膨張および乾燥収縮の傾向にあることは骨材と同様であることが認められる。

(5) 各材料の比較

前記した各材料のそれぞれの典型的な測定例を同一の図で示せばFig. 8のようになる。

ペーストの体積変化は骨材に比べてきわめて大きく、コンクリートの体積変化を支配する最も重要な因子はペーストの体積変化であることがこの図からも認められる。

また、普通、軽量骨材を比較すると、普通骨材が軽量骨材の数倍の体積変化を示しており、この現象は骨材自体の空隙量や弾性係数などを考慮することによって導かれる予想とはまったく逆の結果となっている。この骨材相互の相対的な比較により、本研究の課題のひとつであった軽量コンクリートの乾燥収縮が予想外に小さい現象の原因を説明することが可能になる。すなわち、軽量コンクリートの乾燥収縮値が小さいのは軽量骨材自体の収縮が普通骨材よりも小さいためである。

従来からコンクリートの乾燥収縮に関する研究は数多く行われているが、その中でPickett, G⁷⁾が乾燥収縮はコンクリート中のペーストの容積の関数で表わされるとし、次式を提唱している。

$$S = S_0(1-g)^\alpha$$

$$\alpha = \frac{3(1-\mu)}{1+\mu+2(1-2\mu_g)E/E_g} \dots\dots\dots(2)$$

ここに、 S および S_0 : コンクリートおよびペーストの乾燥収縮、 g : 骨材の絶対容積、 μ および μ_g : コンクリートおよび骨材のポアソン比、 E および E_g : コンクリートおよび骨材の弾性係数。

コンクリートの乾燥収縮を支配するのがペーストの収縮であることはFig. 8によって確認されており、上式が基本的に妥当であることが認められる。しかし、異種骨材を用い、容積配合などの条件をまったく同一にしたコンクリート間の乾燥収縮を上式によって比較すれば骨材の弾性性質が問題になり、弾性係数の小さい軽量骨材はペーストの収縮を拘束する力が弱いためそれを用いた軽量コンクリートの乾燥収縮は普通コンクリートに比べ大きいという結果になってしまう。そして、このような上式に基づく推定はたとえば筆者らの実験結果⁹⁾によって否定される。このことは上式が乾燥収縮値を求める理論式として不完全であることを意味し、その不完全さの由来が骨材自体の乾燥による体積変化を看過していることにあるのはいうまでもない。したがって、今後は骨材の体積変化も加味した理論式の確立が望まれる。

このように、式(2)および本実験の結果を考慮に入れば、コンクリートの乾燥収縮には骨材自体の弾塑性性質および体積変化が関連し、しかもこれらの値は骨材の品質によって多様であり、コンクリートの乾燥収縮におよぼす骨材の影響を一概に論ずるわけにはいかないことになる。そのため、本実験とは逆に、軽量コンクリートの乾燥収縮の方が大きいとする内外の論文³⁾も少なくないと考えられる。

いずれにせよ、本実験の範囲内では骨材の収縮が小さい点で軽量コンクリートにとって好ましい結果が得られたといえる。これは逆の見方をすれば、Fig. 3のように吸水量が1%に満たない普通骨材でも 500×10^{-6} 程度のひずみを示すものもあり、普通骨材の体積変化に関する従来の評価は過小であったといわざるを得ない。

(6) コンクリート中での軽量骨材の体積変化

軽量骨材は前述したように外部の湿度条件により複雑な体積変化をする。水中および空中で見受けられたこれらの体積変化がコンクリート中でどのように具現するかを確認するため、実際に軽量コンクリート中にFig. 9に示すように抵抗線ゲージを貼付した軽量骨材粒を埋め込み、コンクリートの乾燥に伴う骨材の体積変化を測定した。

乾燥に伴いコンクリート内部の含水状態は変化し、軽量コンクリートの場合は表面部と内部との含水量勾配が特にきつくなる⁸⁾。そのため、埋め込み箇所により試料の体積変化は異なる様相を呈することが予想されるが、Fig. 9の実測結果はその違いが著しいことを示し

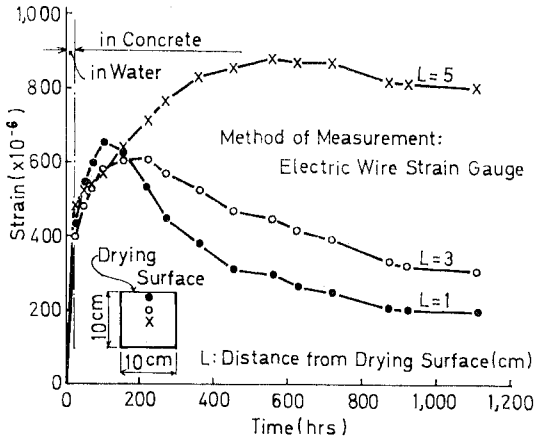


Fig. 9 Volumetric change of lightweight aggregate (coated type M) in concrete.

ている。すなわち、はじめは各試料とも一樣に膨張するが、表面近くにある試料はしだいに収縮し、長時間経過すると埋め込み時より収縮した値を示しているのに対し、供試体の中心に埋め込んだ試料はかなり長時間にわたり膨張を継続している。特に注目すべき点は中心部にある試料の膨張現象であり、この膨張の原因としては試料が周囲のペーストから吸水することのほか、Fig. 5の霧室で生じたと同じ現象がコンクリート中でも生じたことが考えられる。

そして、この膨張現象は乾燥時における軽量コンクリートの引張・曲げ強度低下の問題と深く関連する。なぜなら、乾燥過程においてコンクリートの内部の方が依然として湿潤状態にあればそこにある軽量骨材は膨張を継続し、コンクリート表面部の収縮を拘束するばかりでなく、さらに表面部を引張して表面部に発生する引張内部応力を大きくする方向に作用するからである。このように、打設前にある一定の水量を含んだ軽量骨材の高湿中における独特な体積変化は強度低下を促進する一因と考えられ、看過できない。しかし、強度低下は普通コンクリートにも見受けられる現象であり⁴⁾、低下の本質的な原因を骨材の体積変化のみで説明するのは不可能である。したがって、両コンクリートの強度低下の程度に差が存在する原因の一要因として上記現象をとりあげるのにとどめるのが妥当といえよう。

4. 体積変化のメカニズム

得られた実験結果をもとにして乾湿に伴う骨材の体積変化のメカニズムを考察してみる。

(1) 体積変化の起因

体積変化のメカニズムを考える場合、まず明らかにす

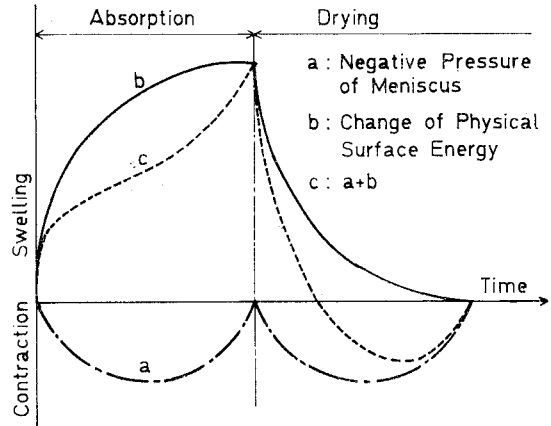


Fig. 10 Driving force carrying volumetric change of aggregate (schematic view).

る必要のあるのは体積変化をもたらすのは何かという点であろう。多孔体に関する従来の研究などを参考にすると、この起因となるものとしては次の三通りが考えられる。

ひとつはメニスカスの負圧であり⁹⁾、これによる長時間水中浸漬後乾燥させた場合の体積の経時変化を模式的に示せば Fig. 10の(a)のような曲線になり、吸水および乾燥過程でそれぞれ収縮と膨張の両現象が生ずることになる。

次に考えられるのは物理的表面エネルギーの変化であり、これが主因とすれば同図の(b)のように吸水過程で膨張を、乾燥過程で収縮を生ずる形をとる。

表面エネルギーの変化は化学的な原因によっても生ずる。これが三番目に考えられる起因であり、骨材を対象とする場合はいわゆる水和膨張¹⁰⁾がこれに相当する。これが体積変化の主因とすると、水中浸漬により骨材は膨張し、この現象は非可逆的であるから乾燥時に収縮は生じない。ところが、前掲した実測結果はほとんど可逆的であり、水和膨張を否定する結果となっている。しかし、これらの結果のみで水和膨張を全面的に否定するのは性急すぎよう。なぜなら、水和膨張の生ずる可能性のあるのはシリケートなどを有し、活性状態にある軽量骨材であり、前掲の軽量骨材は測定以前に乾湿の履歴をかなりの回数受けたものであるから化学的反応がすでに終了していたため水和膨張が生じなかったのではないかという懸念が残るからである。この懸念を払拭するには活性状態の骨材を用いて同様の測定を行う必要がある。

Fig. 11は測定以前に乾湿の履歴を受けたことのない造粒型Mを用いた結果であり、Fig. 4と比較すると、ひずみの大きいこと、乾燥長時間を経てもひずみの残留していることが特徴的である。この原因としては水和膨張を考えるのが妥当であろう。図のように、二度目の水中

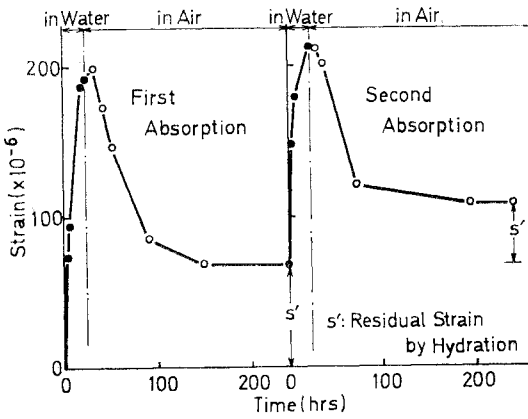


Fig. 11 Volumetric change of lightweight aggregate (pelletized type M) with no absorption of water after sintering.

浸漬を行うと非可逆的な残留ひずみはいくぶん小さくなっており、また図とは別途に一度目の水中浸漬を長時間行ってから乾燥させ、その後 24 時間水中浸漬して乾燥させたところ残留ひずみは見受けられなかった結果が得られており、水和は徐々に進行することを示している。ひずみの絶対値でも水和の影響は大きく、軽量骨材の体積変化の起因としてこの水和膨張は無視し得ないことになる。しかしながら繰り返して述べるように、この現象は活性状態にある軽量骨材に特有であり、実際に使用する骨材はこの状態にない場合が多いから、ここではこの起因を考慮に入れないことにする。

したがって、骨材の体積変化の起因としてはメニスカスの負圧および物理的表面エネルギーの変化が挙げられることになり、両者にはいずれも理論的根拠があるためどちらも無視し得ない。実際には両者が複合して作用すると考えるのが妥当であろう。しかし、問題の解析を進めるにはこのうちいずれが卓越しているかを定める必要がある。そこで、模式図と得られた実験結果とを対比させてこれを経験的に定めてみることにする。

Fig. 10 は骨材を長時間水中浸漬したのち乾燥させた場合の体積変化の模式図であり、実験結果をこの図と対比させるためには同じ条件で測定した例を用いる必要がある。Fig. 12 はこの条件のもとに行った測定例であり、模式図と比較すると測定値は水中浸漬時および乾燥時ともに曲線 (b) に類似していることが認められる。このことから、骨材の体積変化を生じさせる最大の原因は本実験の範囲内では物理的表面エネルギーの変化であると推察される。もしメニスカスの負圧の影響があるとすれば、体積変化は模式図の (c) のような形をとるはずであるが、このような傾向は実測値に見当たらない。したがって、骨材は負圧の生じにくい内部組織を有しているように思われる。

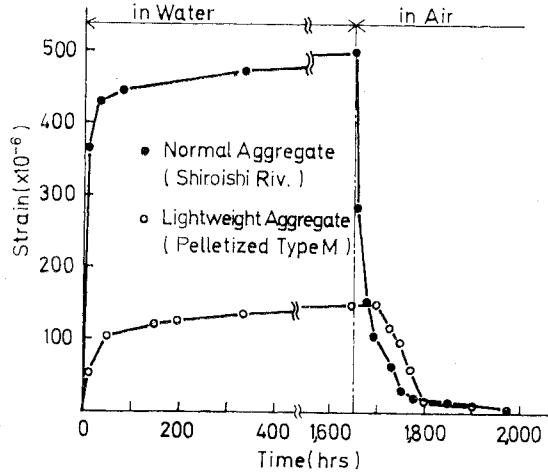


Fig. 12 Volumetric change of aggregate by absorption for a long time and drying.

近藤ら⁹⁾は試作した軽量骨材を対象として乾湿に伴う長さ変化の測定を行い、乾燥後期において著しく膨張する結果を得、その理由としてこのメニスカスの負圧の消滅を挙げている。この結果はコンクリート表面部に埋設した軽量骨材について行った小林ら¹¹⁾および村田ら¹²⁾の測定によって確認され、またこの乾燥膨張現象は前述した軽量コンクリートの諸問題を解明するうえできわめて合理的な理由となりうることから、今日ではいわば定説化している。しかしながら、現に市販されている軽量骨材を対象として直接的な測定を行った本実験の結果はこの説とは全く相反するものであり、従来の定説に疑問を投げかけている。既往の研究と本実験との根本的な相違は用いた方法にあり、その方法の違いが結果にも影響をおよぼしていると思われるが、得られた結果およびそのメカニズムに関する考察が本質的に異なる以上、この間

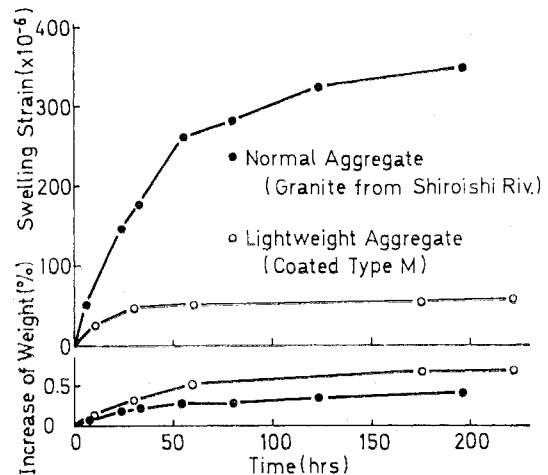


Fig. 13 Volumetric change of aggregate due to adsorption (in air RH₂100%).

題は再検討の必要があると考えられる。

本文では得られた結果から上述のように骨材の体積変化の起因を物理的・表面エネルギーの変化であると推定したが、この妥当性を確認するため、さらに次に述べる骨材の吸着に関する実験を行ってみた。

絶乾状態の骨材を霧室 (R.H. 100%) 中に放置した場合、骨材が吸着性の物質であれば重量が増加する。そして、重量が増加したとしてもこの場合には水中浸漬した場合ほどにはメヌカスが形成されず、それでも体積変化が生じたとすればその起因は吸着に伴う物理的・表面エネルギーの変化である可能性が大きいことになる。

Fig. 13 にその測定例を示した。普通骨材、軽量骨材ともに重量が増加することは両骨材ともに吸着性の物質であることを示しており、またかなりの膨張ひずみが生ずることは骨材の体積変化の起因が主に物理的・表面エネルギーの変化であることを示している。水中浸漬の場合と比較すると、含水量が僅少であるにもかかわらず膨張ひずみは大きく、特に普通骨材は環境条件が霧室であってもその膨張ひずみは水中浸漬に匹敵するような値となっている。したがって、体積変化には骨材の実質を覆う水分が主として関連し、他の大部分の水分の影響は本質的でないことが認められる。

(2) 物理的・表面エネルギーの変化による体積変化

Bangham, D.H. ら¹³⁾によると、表面エネルギーの変化による多孔体の長さ変化 dl/l は次式のようになるとしている。

$$\frac{dl}{l} = K(r_0 - r') = \frac{S\rho r}{E} \dots\dots\dots(3)$$

ここに、 r_0 : 固体の真空中での表面エネルギー、 r' : 吸着層をもつ固体の表面エネルギー、 r : $r_0 - r'$ 、 S : 表面積、 ρ : 真比重、 E : ヤング係数。

多孔体に関して導かれた上式を参考にすると、物理的・表面エネルギーの変化によってもたらされる骨材の体積変化の値を規定する要因としては表面張力、内部表面積 (空隙を囲む実質の表面積)、真比重および弾性係数が挙げられることになり、これらの要因のうち異種骨材間の体積変化を比較する場合に最も大きな影響をもつのは内部表面積であろうと推察される。そこで、骨材の体積変化に関して次式のような仮定をし、この仮定の妥当性を検討してみる。

$$dl/l = K'S \dots\dots\dots(4)$$

内部表面積の測定は BET 一点法で行った。吸着ガスとしては窒素を用い、比表面積の計算には $\sigma_m = 16.2 \text{ \AA}^2$ (吸着分子 1 個が固体表面を占有する面積) を用いた。この測定結果と長時間 (約 1600 時間) 吸水時点での膨張ひずみとの関係を Fig. 14 に示す。

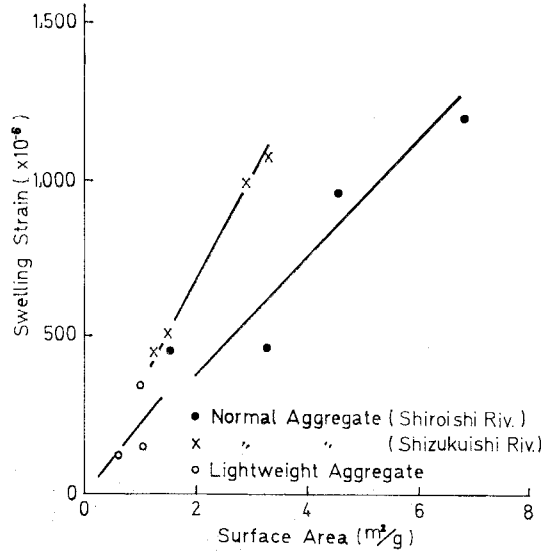


Fig. 14 Relation between internal surface area and swelling strain by absorption for a long time.

Fig. 3 および Fig. 6 では吸水量と膨張ひずみとの関係を求めたが、特に軽量骨材の場合は明確な相関関係が存在せず、ましてや普通、軽量両骨材を同一の座標で示せば統一的な説明は不可能であった。一方、Fig. 14 の場合は両骨材を包括した傾向が見受けられ、ひずみは内部表面積にほぼ比例する。したがって、骨材の体積変化の値を左右する最も重要な因子は内部表面積であり、これを表した式 (4) は基本的に妥当であると考えられる。ただし、多少でもばらつきが存在する点および骨材の種類別、産地別によって直線の勾配にいくぶんの差が存在する点は看過できない。この原因は式 (4) の係数 K' が厳密には定数でなく、表面張力、真比重および弾性係数の関数であることにあるのはいうまでもない。

(3) 骨材の細孔構造と体積変化との関連

上述のように、骨材の体積変化は細孔構造を表示する物理量のひとつである内部表面積によって基本的に決定される。しかし、このことは十分飽水した場合の膨張ひずみに関してのみ妥当であり、前掲した実験結果には単に内部表面積のみでは説明不可能な現象も存在した。たとえば、特に軽量骨材に関して見受けられた含水量とひずみの経時変化がかならずしも軌を同一にしない現象などはその例といえよう。そして、これらの現象の原因説明には細孔構造を表示する他の物理量と体積変化との関連を知る必要があると考えられる。

骨材の破断面を観察すれば、多数の空隙が存在し、それら空隙の大きさにも多様性のあることが認められる。この大きさの分布がいわゆる細孔径分布であり、広い範

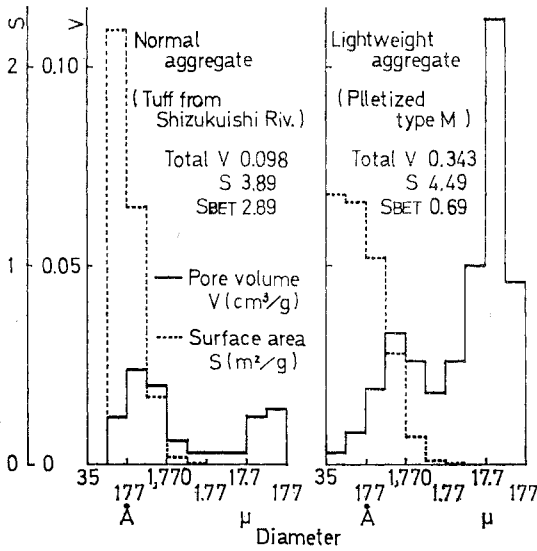


Fig. 15 Pore size distribution measured by mercury penetration method.

囲の細孔径を測定するには水銀圧入法が最適といわれている。Fig. 15はこの水銀圧入法による細孔径分布は測定結果であり、体積の分布は実測値、表面積の分布は体積の実測値をもとに空隙を円筒と仮定して求めた計算値である。

骨材の特性から予想されるとおり、軽量骨材はたしかに空隙が多く、総体積で普通骨材の3.5倍の値を示している。図より、両者の体積に違いが存在するのは主として粗大孔の差によることが明らかである。すなわち、軽量骨材の場合は粗大孔がきわめて卓越している。一方、体積を表面積に換算すると、同様に軽量骨材の方が大きな値を示しているが、その差はわずかである。そして、より重要なことは両者の関係がBET一点法による実測値とは逆であることであろう。特に軽量骨材の場合水銀圧入法による計算値とBET一点法による実測値は大きく異なっている。表面積に関してはBET一点法の方が信頼性が高いと考えられるので、計算値が過大な表面積を与えていることになる。そして、この理由としては次の2点が考えられる。ひとつは計算の仮定、すなわち空隙を円筒と仮定したことに妥当性を欠いたことであり、ふたつめはFig. 15より明らかなように表面積は主として微細孔によって支配され水銀圧入法ではこの微細孔を過大に見積ったことである。この点を確認するため、主として問題のある軽量骨材についてガス吸着法による細孔径分布の測定を行ってみた。

Fig. 16は造粒型Mの窒素吸着等温線であり、この図を利用していわゆるBETプロットを行い表面積を求めると、 $S=0.49 \text{ m}^2/\text{g}$ となる。また、吸着等温線を

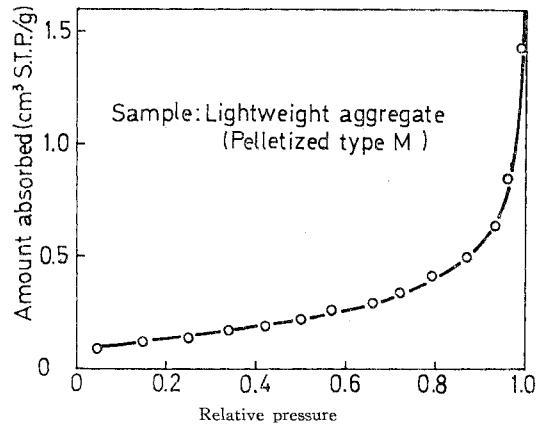


Fig. 16 Absorption isotherm.

Table 3 Calculation of pore size distribution by modelless method.

Relative Pressure	Cylindrical pore		Parallel pore	
	S	V	S	V
1.00~0.95	0.055	10.56	0.052	10.53
0.95~0.90	0.076	5.05	0.067	4.99
0.90~0.85	0.034	1.38	0.029	1.35
0.85~0.80	0.030	0.88	0.025	0.85
0.80~0.75	0.032	0.74	0.026	0.71
0.75~0.70	0.040	0.75	0.031	0.71
0.70~0.65	0.041	0.64	0.030	0.60
0.65~0.60	0.012	0.16	0.009	0.15
0.60~0.55	0.024	0.28	0.017	0.26
0.55~0.50	0.043	0.45	0.030	0.40
0.50~0.45	0.036	0.34	0.024	0.29
0.45~0.40	0.018	0.15	0.012	0.13
0.40~0.35	—	—	—	—
Σ	0.441	21.38	0.352	20.97

S: m^2/g , V: $\text{cm}^3/\text{g} \times 10^{-4}$

モデルなし法で解析すればTable 3のようになる。

表中の表面積の積算値ΣSをBET表面積と比較すると、細孔を円筒状と仮定した場合の方がより近似していることが認められる。したがって、この結果からすれば前述の計算の仮定はほぼ妥当であったことになる。次に、この円筒状の計算結果をもとにきわめて微細な範囲の細孔径分布を求め、水銀圧入法による結果と比較したのがTable 4である。

微細孔の測定に関してはガス吸着法の方が信頼性が高いと考えられるので、水銀圧入法では微細孔を過大に評価していたことになる。したがって、前述の計算値の問題点は第2の理由に起因することが明らかになったといえる。このように、水銀圧入法の場合微細孔の存在を過大評価した理由としてはボトルネック効果および閉孔の

Table 4 Comparison of pore size distribution.

Pore diameter	Adsorption method	Mercury penetration method
35~59 Å	0.0001 cm^3/g	0.0033 cm^3/g
59~177 "	0.0003 "	0.0076 "

存在などが挙げられる。また、軽量骨材中に微細孔が少ないのは骨材製造過程において高温で焼成されることにより、骨材実質の組織が再配列し、実質間に存在していた微細孔が減少するためと考えられる。そして、微細孔の少ないことが軽量骨材の表面積の小さい原因となり、体積変化の小さいことにつながることは明らかである。

以上の細孔径分布の実測値および破断面の目視観察により軽量骨材の空隙について検討すると、その空隙は形態的に骨材表面から内部に達している大きな割れ目、実質に囲まれている可視的な大きい空隙（粗大孔）および実質中の微細な空隙（微細孔）の3つに分類できると思われる。前述した軽量骨材の独特な体積変化にはこれらの空隙の形態的な多様性が複雑に関連すると予想され、この関連を具体的に考察するにはこれらの空隙間の水分の移動過程を明らかにする必要がある。

まず吸水過程を考えると、それぞれの空隙への水分浸透のメカニズムの相違により、上記3種の空隙への浸透速度には差が存在し、時間的序列をつけるなら割れ目、微細孔、粗大孔の順に浸透することになる。このことは水分が浸透していく過程を顕微鏡で観察すれば容易にわかる。すなわち、まず大きな割れ目に水分が浸透し、続いて粗大孔をさけるようにして微細孔が充填され、最後に粗大孔が満たされる。したがって、微細孔は粗大孔のみずみちと見なすことができよう。この吸水過程を考慮に入れると、軽量骨材の吸水時の体積変化は次のようになると推察される。吸水初期は粗大な割れ目への浸透が主であることにより含水量の増加に比べ膨張は比較的緩慢であろう。続いて微細孔への浸透が卓越してくると吸水面積が増大し、骨材は急激に膨張する。さらに吸水が進み水分の浸透が粗大孔へと移行すれば、含水量が増大するにもかかわらず膨張は緩慢になる。

次に、十分吸水している軽量骨材の乾燥過程を考えると、まず粗大な割れ目に浸透していた水分が蒸発する。常識的に考えて続いて粗大孔から蒸発することになるが、これは骨材表面近くの粗大孔に関して妥当であり、骨材の奥にある粗大孔に含まれている水分はかならずみち（微細孔）を通過して外部に蒸発しなければならない。したがって、まず微細孔から水分が蒸発し、蒸発した分だけ粗大孔から水分が供給されることになると思われる。結果的には微細孔からの蒸発が最後になるが、体積変化や含水量変化にはこの過程が重要な影響をおよぼすと思われる。このような水分の移動過程により、軽量骨材の乾燥時の体積変化は次のようになると推察される。乾燥初期は粗大な割れ目および粗大孔からの蒸発が先行し、含水量は急激に減少するが、微細孔には水分が残留するため収縮はそれほど生じない。そして、微細孔から蒸発するまで乾燥が進行すると、収縮は急激となる。

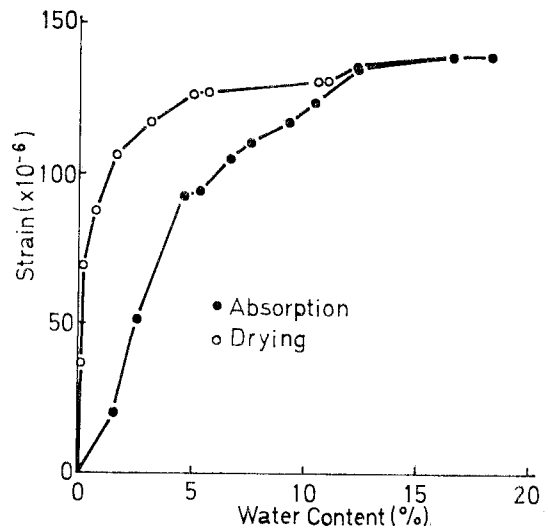


Fig. 17 Relation between water content and strain of lightweight aggregate (pelletized type M).

このような推察が妥当であることは Fig. 17 の結果から認められる。この図は造粒型 M を長時間水中浸漬後乾燥させた場合の含水量とひずみの関係を示しており、その軌跡が上記推定通りとなっている。したがって、軽量骨材の体積変化には細孔径分布および水分の移動過程が関連することは明らかであり、これらが体積変化の形態を複雑にしているといえよう。

Fig. 5 に見られた軽量骨材の短時間吸水後高温空中での膨張現象も水分の移動過程によって説明可能である。すなわち、水分の移動は骨材内部と外部との湿度の差によって生じ、外部の湿度が高い場合には前述の水分移動がいまだに吸水していない内部の方へと向けられる。そのため膨張が継続すると考えられ、この現象が前述したいわゆる乾燥膨張とは性質を異にすることは明らかである。

5. 結 論

骨材の乾湿に伴う体積変化を独自の方法を用いて測定したところ、以下に列挙する結論が得られた。

(1) 骨材の体積変化はセメントペーストに比べきわめて小さく、コンクリートの体積変化を支配する最大の要因がペーストの体積変化であるとする従来の定説を裏付ける結果となった。しかし、従来のコンクリートの体積変化に関する理論では骨材の体積変化を無視してきた傾向があり、特に異種骨材を用いたコンクリート間の比較を行う場合にはこの骨材の体積変化を看過できない。

(2) 普通、軽量両骨材を比較すると、普通骨材の方が大きい体積変化を示す傾向にある。この結果により、

軽量コンクリートの乾燥収縮が予想外に小さい現象の原因が説明可能となった。

(3) 骨材は水中で膨張し、乾燥すれば収縮する傾向にある。ただし、軽量骨材は乾燥時に独特な体積変化を示す。すなわち、含水量の減少に比べ収縮は緩慢で、外部の湿度条件によっては水中浸漬と同様の膨張を長時間にわたって継続する場合もある。軽量骨材のこの特異な現象の原因は細孔径分布および骨材内部での水分の移動過程によって説明可能であり、またこの現象は軽量コンクリートの乾燥時における引張・曲げ強度低下の問題に深く関連する。

(4) 体積変化の傾向から判断して、骨材の体積変化をもたらす最大の起因は物理的・表面エネルギーの変化であると考えられる。また、体積変化の値を左右する最大の因子は骨材の内部表面積であることが明らかとなった。

おわりに、本研究にご協力いただいた東北大学ならびに岩手大学のコンクリート研究室各位に深甚の謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) たとえば、セメント協会収縮専門委員会：収縮専門委員会報告，セメント技術年報 XXVII，pp. 11～14，1973.
- 2) 藤原忠司・飯泉 章：コンクリートの乾燥時における引張・曲げ強度低下について，昭和48年度土木学会東北支部技術研究発表会講演概要，pp. 110～112，1974.
- 3) たとえば，Shideler J.J.：Lightweight-Aggregate Concrete for Structural Use，Journal of ACI 54，pp. 299～328，1957.
- 4) 藤原忠司・椎子国成・飯泉 章：乾燥にともなう軽量コンクリートの強度変化について，昭和49年度土木学会東北支部技術研究発表会講演概要，pp. 111～112，1975.
- 5) 後藤幸正・外門正直・原田喜三郎・藤原忠司：人工軽量骨材コンクリートの性質および乾燥の影響について，土木学会第25回年次学術講演会講演集，pp. 153～154，1970.
- 6) 今西誠也：コンクリート骨材の岩石学，セメントコンクリート No. 331，pp. 39～44，1974. 9.
- 7) Pickett G.：Effect of Aggregate on Shrinkage and Hypothesis Concerning Shrinkage，Proc. ACI 52，pp. 581～590，1956.
- 8) 藤原忠司：乾燥にともなうコンクリート内部の含水量変化について，土木学会第29回年次学術講演会講演集，pp. 197～198，1974.
- 9) 近藤連一・関口明男・皆川忠昌：人工軽量骨材の細孔径分布と膨張収縮特性，セメント技術年報 XXI，pp. 485～492，1967.
- 10) 素木洋一：セラミック外論，窪業協会誌 72 [4]，c 381～386，1954.
- 11) 小林一輔・伊藤利治：人工軽量骨材コンクリートの諸性質におよぼす乾燥の影響，コンクリートライブラリー第24号，pp. 40～44，1969.
- 12) 村田二郎・神山行男・大塚茂雄：軽量骨材コンクリートの乾燥による強度低下に関する考察，土木学会第25回年次学術講演会講演集，pp. 149～151，1970.
- 13) Bangham D.H. and N. Fakhoury：The Swelling of Charcoal，Proc. Roy. Soc.，London，A 130，pp. 81～89，1930. (1975.7.5・受付)