

論文 長期間貯蔵したアルカリ骨材反応供試体の膨張, 微細構造及び強度性状

岩月栄治*¹・森野奎二*²

要旨: 11年間貯蔵していたモルタルバーについて、膨張率、ひび割れ状態、反応生成物、強度及び超音波速度を測定した。ここで用いられた反応性骨材はクリストバライト、トリジマイト及びオパールからなる反応性の高いシリカ鉱物であり、このモルタルバーにおいては、11年経過していても反応が継続し、膨張するシリカ鉱物が観察された。また、モルタルバー膨張率と強度及び超音波速度との関係を明らかにし、膨張率に対する強度低下率や速度低下率を示した。

キーワード: アルカリ骨材反応, モルタルバー, シリカ鉱物, ひび割れ, 強度試験

1. はじめに

アルカリ骨材反応(以下AAR)が起こった実構造物の強度や弾性係数の低下を知ることは重要である。しかし、実構造物での膨張量や強度を測定することは容易ではない。一方、モルタルバーやコンクリートプリズムにおいて膨張率や劣化状況を測定した後に強度、弾性係数、超音波速度を測定することは容易であり、AARによる変状と上記の物性との関係を明らかにすることは可能である。すでにこの種の研究はなされてはいるが[1]、本研究では特に長期間の膨張量や劣化状況を測定してきたモルタルバー供試体を用いて圧縮、曲げ、引張強度及び静弾性係数と超音波速度測定を行い、相互の関係について検討した。

2. 実験方法

2. 1 強度試験に用いたモルタルバー供試体

試験に用いた供試体は1984年にASTM C227に準じて作製した28×28×286mmモルタルバー供試体であり、適宜膨張率の測定を行ってきたものである。モルタルバーの使用骨材の比重、吸水率、化学法試験結果を表-1に示す。反応性骨材は鹿児島県硫黄島産のクリストバライト、トリジマイト及びオパールからなる極めて反応性の高い岩石(以下シリカ鉱物と称す)であり、これを破砕して用いた。ASTM C289化学法試験結果では「潜在的有害域」にプロットされ、最近のJIS 5308では「無害でない」のBに区分されるものである。非反応性骨材は、矢作川川砂を使用している。シリカ鉱物の混合比は、5, 10, 15, 20, 25, 30及び100%である。使用セメントは普通ポルトランドセメント($\text{Na}_2\text{Oeq}0.81\%$)で、添加アルカリは、 NaOH をセメント質量の3.0%($\text{Na}_2\text{Oeq}3.13\%$)と NaCl を同様に0.1, 0.5, 1.0%($\text{Na}_2\text{Oeq}0.86, 1.08, 1.34\%$)である。供試体は底部に水を入れた貯蔵容器に入れ、8ヶ月まで38°Cの恒温室、以後は常温の実験室に設置した。貯蔵2年時の供試体の観察では、ポップアウト、ひび割れ及びシリカ鉱物の溶解がみられたものである[2]。

表-1 使用骨材の比重、吸水率、化学法試験結果

骨材	比重	吸水率 (%)	化学法(mmo/l)		構成鉱物
			Sc	Rc	
シリカ鉱物	1.88	14.7	1202	335	クリストバライト、トリジマイト、オパール
矢作川川砂	2.55	0.65	19	103	石英、長石、雲母

* 1 愛知工業大学助手 工学部土木工学科、工修(正会員)

* 2 愛知工業大学教授 工学部土木工学科、理博(正会員)

2.2 強度試験及び超音波速度測定方法

貯蔵11年の膨張率測定及び劣化状況を観察した後、4本のモルタルバーの内、3本を超音波測定や各種強度試験用供試体とし、1本はそのまま貯蔵を継続している。その概要を図-1に示す。超音波測定は市販のデジタル式測定器を使用(振動子周波数:50kHz)し、縦波及び横波速度を2個の供試体を用いてそれぞれ3ヶ所測定して平均した。曲げ試験は三等分点載荷と中央集中載荷を行い、曲げ強度値には前者を用い、後者はその折片を圧縮試験及び静弾性係数測定(ひずみゲージ長:10mm)に用いた。引張試験は供試体を直接引張る純引張試験とした。1試験の供試体数は曲げ及び引張3、圧縮8及び静弾性係数2個とした。試験後の破片の実体顕微鏡観察を行った。

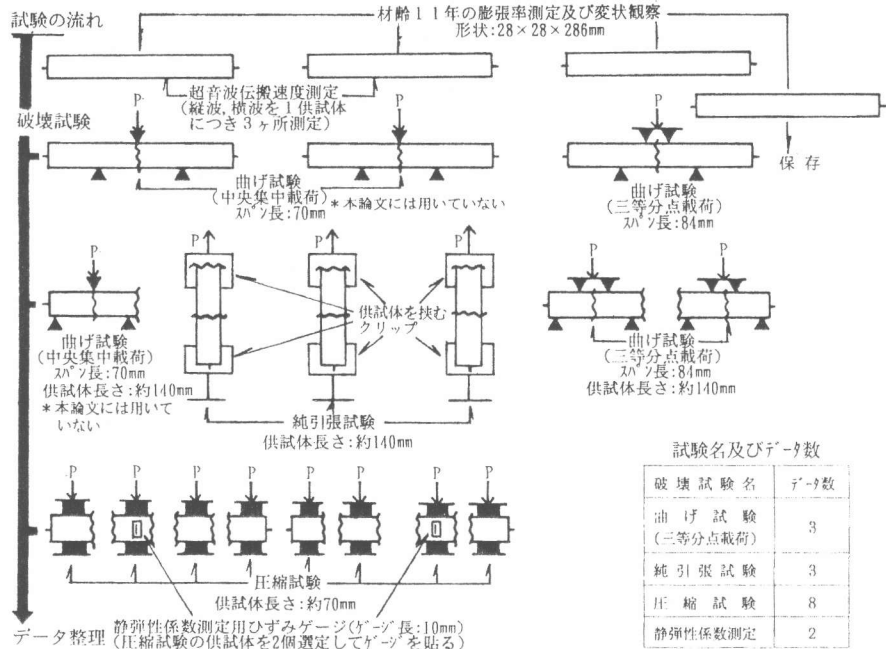


図-1 試験の概要

それぞれ3ヶ所測定して平均した。曲げ試験は三等分点載荷と中央集中載荷を行い、曲げ強度値には前者を用い、後者はその折片を圧縮試験及び静弾性係数測定(ひずみゲージ長:10mm)に用いた。引張試験は供試体を直接引張る純引張試験とした。1試験の供試体数は曲げ及び引張3、圧縮8及び静弾性係数2個とした。試験後の破片の実体顕微鏡観察を行った。

3. 実験結果及び考察

3.1 貯蔵11年のモルタルバー膨張挙動

図-2に貯蔵11年時のモルタルバー膨張率

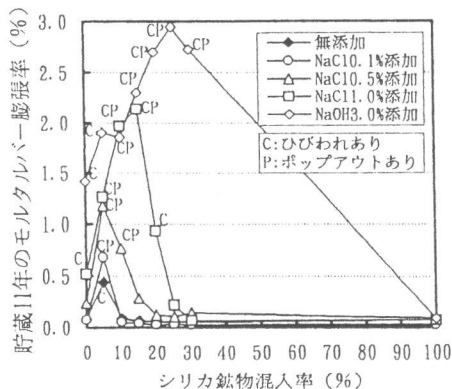


図-2 貯蔵11年時のモルタルバー膨張率

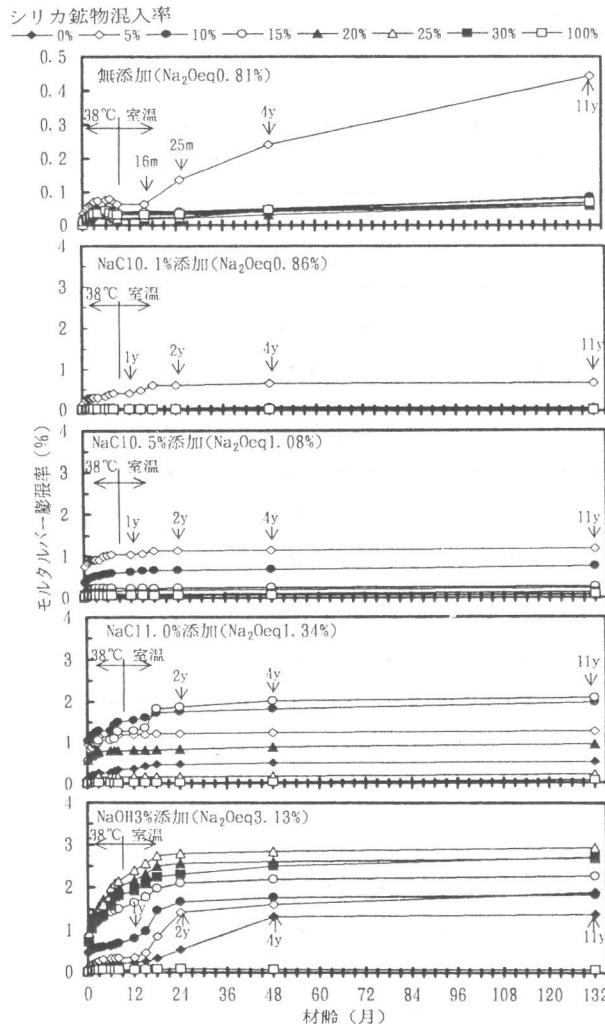


図-3 貯蔵11年間のシリカ珪物混入モルタルバーの膨張率

を示す。膨張率は全体で0.07~2.95%の範囲であり、アルカリ量の増加に伴って膨張率は増加している。ペシマムの位置も同様にシリカ鉱物混入率の5%から25%の混入率の多い方向へ移動している。膨張率のばらつきは、平均値±15%の規格内に入っているのは74%であった。図-3に作製時からの膨張挙動を示す。図では貯蔵2年でほとんど主要な膨張を終え、以後貯蔵11年まで若干の膨張を示している。しかし図の上段に示したアルカリ無添加($\text{Na}_2\text{Oeq}0.81\%$), シリカ鉱物5%混入の場合は貯蔵16ヶ月以後から膨張を開始し、貯蔵11年

においても膨張の増加がみられたので、この特徴を鮮明に示すために縦軸のスケールを拡大して示した。供試体のアルカリ量が少なく温度も室温程度(約20℃)では、相当遅れて膨張が起こることを示している。実構造物においても数年間ひび割れがなかったものが、ある時期からひび割れが発生しだし、それ以降は急激に増加する現象がみられるがそれと同様のものである。

3.2 モルタルバ-表面の劣化状況

表-2 貯蔵11年のモルタルバ-表面の劣化状況観察結果

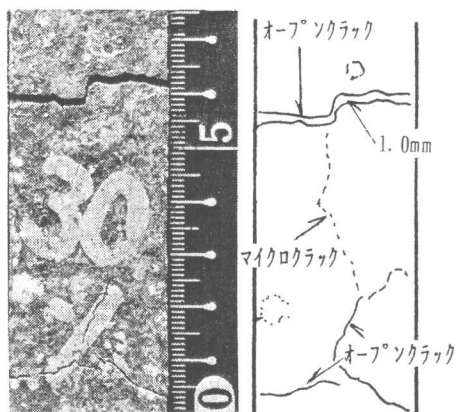
添加アルカリ	シリカ鉱物混入率(%)							
	0	5	10	15	20	25	30	100
無添加 $\text{Na}_2\text{Oeq}0.81\%$	変状なし	P:+++ Mc:+++	P:++	P:+	P:+	P:+	P:+	変状なし
$\text{NaCl}10.1\%$ $\text{Na}_2\text{Oeq}0.86\%$	P:+	P:++ Mc:++ Po:++ D:+	P:++	P:++	P:++	P:++	P:++	P:++
$\text{NaCl}10.5\%$ $\text{Na}_2\text{Oeq}1.08\%$	P:++	P:++ Mc:++ Po:+++ D:++	P:++ Mc:+++ Po:++ D:+	P:++	P:++	P:++	変状なし	変状なし
$\text{NaCl}11.0\%$ $\text{Na}_2\text{Oeq}1.34\%$	P:++ Mc:++	P:++ Mc:++ Po:+++ D:++	P:++ Mc:+++ Po:+++ D:++	P:++ Oc:++ Po:++ D:++	P:++ Mc:+	P:++	P:++	変状なし
$\text{NaOH}3.0\%$ $\text{Na}_2\text{Oeq}3.13\%$	P:+++ Mc:+	P:+++ Mc:++	P:+++ Mc:+++ Po:+++ D:++	P:++ Oc:+++ Po:+++ D:++	P:+++ Oc:+++ Po:+++ D:++	P:+++ Oc:+++ Po:+++ D:+++	P:+++ Oc:+++ Po:+++ D:+++	P:++

※変状観察の凡例:

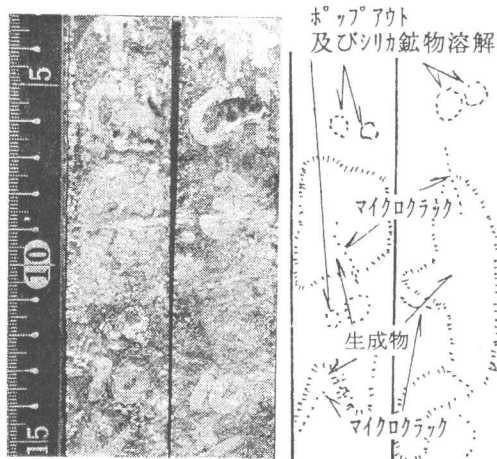
- *P: 供試体表面の白色生成物
- *Po: ポップアウト
- *Mc: マイクロクラック(目視で開口が確認されないひび割れ。約0.2mm以下)
- *Oc: オープンクラック(目視で開口が確認されるひび割れ。約0.2mm以上)
- *D: シリカ鉱物の溶解(供試体表面やポップアウト後にシリカ鉱物が溶解)
- *各変状の程度: 多い>中>少ない=+++>++>+で示す。

※モルタルバ-膨張率の凡例

- : 0.1%以下
- : 0.1~0.5%
- : 0.5~1.0%
- : 1.0~2.0%
- : 2.0%以上



〔写真〕 〔スケッチ〕
写真-1 貯蔵11年のモルタルバ-のオープンクラック(最大幅1.0mm), マイクロクラックの状況
($\text{NaOH}3\%$ 添加、シリカ鉱物混入率30%)



〔写真〕 〔スケッチ〕
写真-2 貯蔵11年のモルタルバ-の生成物, ポップアウト, マイクロクラックの状況
($\text{NaOH}3\%$ 添加、シリカ鉱物混入率10%)

貯蔵11年のモルタルバーの表面の劣化状況観察結果を表-2に示す。白色～無色(ガラス状を含む)の生成物(表中:P)はほとんどの供試体でみられた。表においてひび割れ幅0.2mm以下のひび割れ(マイクロクラック)がみられるのは膨張率0.5%以上のときであり、ひび割れ幅0.2mm以上のひび割れ(オープクラック)がみられるのは膨張率2%以上のときであった。ポップアウト(Po)やシリカ鉱物の溶解(D)がみられたのは膨張率0.5%以上であった。これらのことをまとめると、ひび割れやポップアウトといった明かな劣化現象が見られる膨張率は0.5%以上といえる。貯蔵11年のモルタルバーにみられたひび割れ、生成物、ポップアウト等の状況を写真-1及び写真-2に示した。

3.3 モルタルバー破断面の微細構造

11年間貯蔵したモルタルバーの強度試験後の破片を20℃恒温(湿度95%以上)に約1ヶ月保管した後の破断面の観察結果を表-3に示す。シリカ鉱物では反応環や骨材周囲の変色(表中:A-1)がほとんどの供試体でみられた。ひび割れ発生(A-2)やシリカ鉱物の一部が溶解(A-3)しているものは膨張率0.1%以上であった(写真-3)。また破断後にシリカ鉱物が膨張した状態(A-4、写真-4)が、表に示した4供試体に

表-3 貯蔵11年のモルタルバー破断面の観察結果

添加アルカリ	シリカ鉱物混入率 (%)							
	0	5	10	15	20	25	30	100
無添加 Na ₂ Oeq0.81%	R-1+	A-2++ A-3++ R-1++ R-2++	A-1++ R-2++	A-1+ R-2+	A-1++ R-2+	A-1+ R-1++	A-1+ R-1+	A-1+
NaCl0.1% Na ₂ Oeq0.86%	R-1+	A-3++ A-4+ R-1+++	A-2+ R-1+++	A-1+ R-1+	A-1+ R-1+	A-1+ R-1+	A-1+ R-1+	A-1+ R-1+
NaCl0.5% Na ₂ Oeq1.08%	A-1+ R-1++	A-2+++ A-3+++ R-1+++ R-2+++	A-3+ A-4+ R-1+++ R-2+++	A-3+ A-4+ R-1++	A-1+ R-1+ R-2++	A-1++ R-1++ R-2++	A-1+ R-1+	A-1+ R-1+
NaCl1.0% Na ₂ Oeq1.34%	A-1++ R-1++ R-2++	A-2++ A-3++ R-1++ R-2++	A-3++ R-1++ R-2++	A-2++ A-4+ R-1+++ R-2+++	A-2+ A-3+ R-1++ R-2++	A-1+++ R-1+++ R-2++	A-1+ R-1++ R-2+	A-1+ R-1+
NaOH3.0% Na ₂ Oeq3.13%	A-1+++ A-2++ R-1+ R-2++	A-2+++ R-1+ R-2++	A-3+++ R-1++ R-2+++	A-3+++ R-1+++ R-2+++	A-3+++ R-1+++ R-2+++	A-2+++ A-3++ R-1++ R-2+++	A-2+++ R-1+++ R-2++	A-1+++ R-1+

※観察の凡例:

- ・A-1: 反応環や骨材周囲の変色が確認される
 - ・A-2: 骨材の一部にひび割れがある
 - ・A-3: 骨材が溶解している
 - ・A-4: 骨材が破断後に反応して膨張している
 - ・R-1: 気泡中や破断面の白色生成物
 - ・R-2: 気泡中や破断面のガラス状又は透明感がある白色の生成物
- 上記の程度: 多い>中>少ない=+++>++>+で示す。

※モルタルバー膨張率の凡例

- : 0.1%以下 □ : 0.1~0.5% □ : 0.5~1.0%
 □ : 1.0~2.0% □ : 2.0%以上

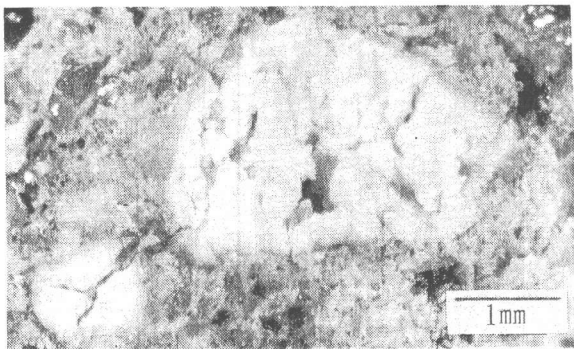


写真-3 破断面のシリカ鉱物の反応状況 (NaOH3%添加、シリカ鉱物混入率15%)

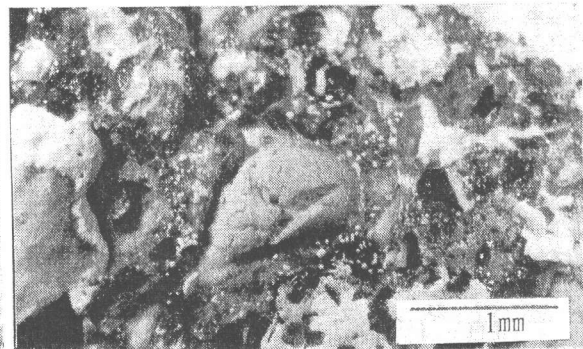


写真-4 破断面の膨張したシリカ鉱物 (NaCl0.5%添加、シリカ鉱物混入率15%)

みられた。これらはいずれもシリカ鉱物混入率とアルカリ量の関係において図-1のベシマム付近であることから、ベシマムの状態では膨張が長期間にわたって起こることを示している。表-3に示した生成物は白色生成物(R-1)とガラス状または透明感のある白色生成物(R-2)に大別され、これらは膨張率が大きいほど多く生成していた。

3.4 膨張率と強度、静弾性係数及び超音波速度の関係

圧縮、曲げ、引張強度及び静弾性係数と貯蔵11年のモルタルバー膨張率の関係を図-4、図-5、図-6に示す。試験結果は圧縮75~16、曲げ11~3、引張7~0.5MPaであった。この強度のばらつきはシリカ鉱物自体の強度の影響も関与しているかも知れない。各試験結果とも膨張率が増加すると強度は減少する関係を示しており、膨張率1%に対する強度低下量は、圧縮12、曲げ2、引張1MPa、低下率では圧縮16~30(平均23)、曲げ18~29(同24)、引張17~33(同25%)であった。なお、図中の破線は、他と傾向の異なるシリカ鉱物100%のデータを省いた回帰一次近似曲線の勾配のみを使用したもので、切片を概ねデータ全体が入るように決めて、平行線を描いたものである。

図-7に静弾性係数の測定結果を示す。図では膨張率が増加するにしたがって弾性係数が低下し、膨張率1%以上では $0.6 \times 10^4 \sim 2.3 \times 10^4$ MPaとなっている。膨張率0.1%付近から1.0%までは弾性係数の低下が著しく、その低下率は37~43%であり、膨張率1%につきその低下率は37~43%(平均40

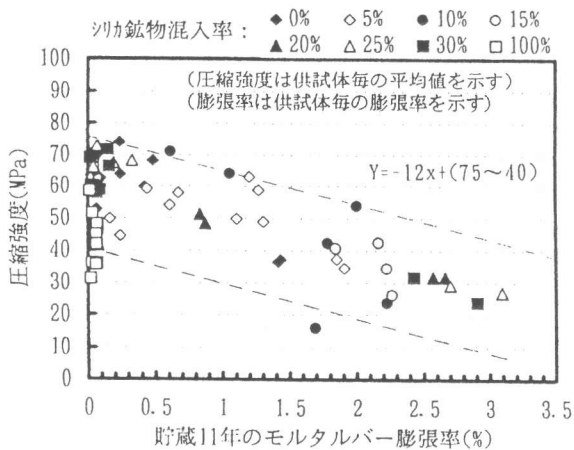


図-4 貯蔵11年のモルタルバー膨張率と圧縮強度の関係

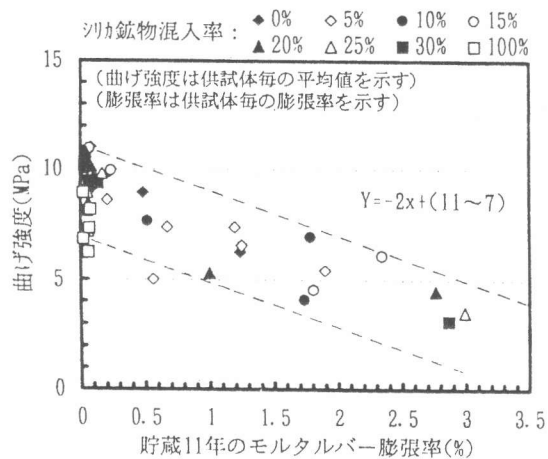


図-5 貯蔵11年のモルタルバー膨張率と曲げ強度の関係

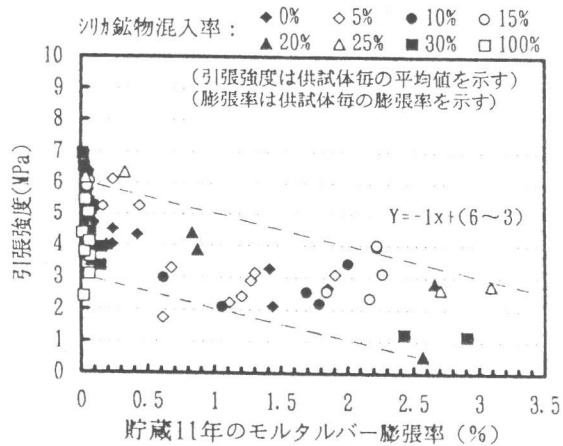


図-6 貯蔵11年のモルタルバー膨張率と引張強度の関係

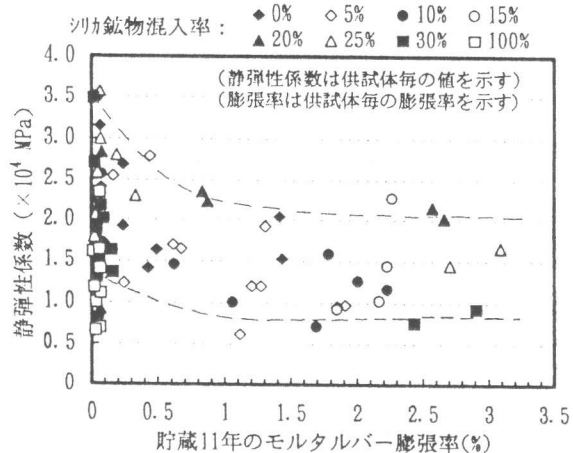


図-7 貯蔵11年のモルタルバー膨張率と静弾性係数の関係

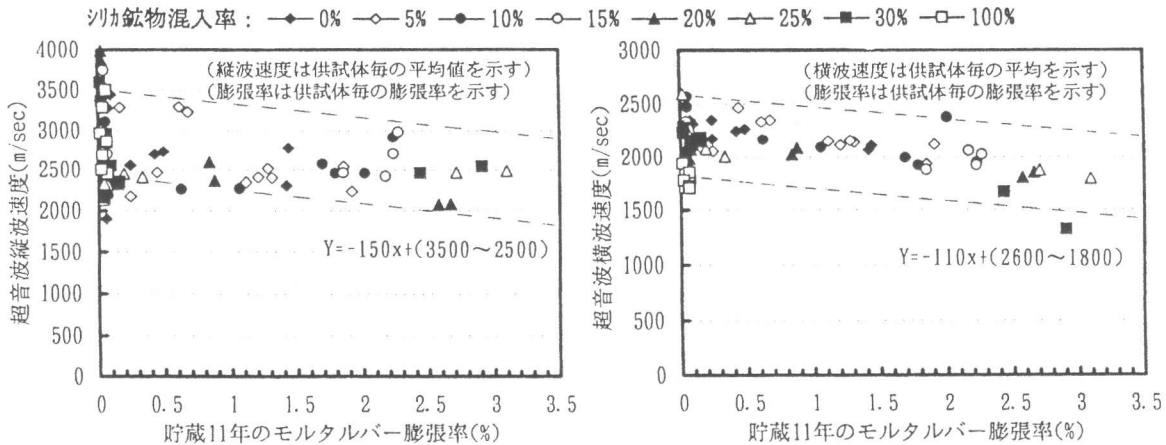


図-8 貯蔵11年のモルタルバー膨張率と超音波速度(縦波、横波)の関係

%)である。この分布範囲の傾向を図中に破線で示した結果は全体に幅広くなっており、例えば膨張率2.5%付近で $0.8 \times 10^4 \sim 2.0 \times 10^4$ MPaであり、劣化が不均一であることを示している。このことはAARの劣化の特徴であろう。

図-8に超音波測定結果を示す。図中の2本の破線は、破壊試験と同様の方法で平行線で示した。超音波速度と膨張率の関係は膨張率1%につき、低下速度は縦波150、横波110m/sec、速度低下率では縦波、横波とも4~6%であり、強度試験の低下率と比較して小さく、音波による劣化の検出は強度試験よりも難しい。測定値が幅広く分布するのは、劣化の不均一性のほかにひび割れや生成物のために振動子の密着性が悪いこと、振動子の周波数に対して供試体が小さいことなどのためと思われる。

幸左ら[3]の調査・実験結果では、反応性骨材と非反応性骨材使用のコンクリート供試体の比較から強度は60%、静弾性係数1/3、縦波速度4.3~4.4から3.8~4.1km/sに低下し、反応性骨材使用供試体のひび割れは幅0.1~0.6mmが図示されている。この結果と比較すると本実験結果の低下率は大きくなっているが、これは本実験のひび割れ幅が最大1.0mmと大きいことが主原因であることその他に供試体寸法が小さいこと、コンクリートとモルタルの違いなどが起因していると思われる。

4. まとめ

貯蔵11年のASRモルタルバーについて、その膨張率、劣化状況、強度試験及び超音波測定から得られた結果をまとめると次のようである。

1. モルタルバーの膨張は貯蔵2年で終了するものが多いが、添加アルカリ量(0.81%)が少なく、ベシマムの場合(シリカ鉱物5%)では11年後においても膨張がみられた。また、膨張しつつある反応性鉱物が観察され、アルカリ骨材反応は相当長期にわたるといえる。
2. 膨張率と強度の関係は膨張率が増加すると強度は低下し、膨張率1%につき平均で圧縮強度は23、曲げ強度は24、引張強度は25%の低下であった。また膨張率1%につき静弾性係数は40%、超音波速度では縦波、横波とも4~6%の低下率であった。

参考文献

- [1]中野錦一、小林茂宏、中上明久：アルカリシリカ反応による損傷度とコンクリートの諸物理特性との関連性の検討、セメント技術年報41巻、pp.419-422、1987.12
- [2]森野奎二、柴田国久、岩月栄治：モルタル中のシリカ鉱物の溶解とひび割れ発生との関係、土木学会中部支部研究発表会講演概要集、pp.400-401、1987.3
- [3]幸左賢二、小林和夫、白野弘明：反応性骨材コンクリートの調査と実験の概要、土木学会年次学術講演会概要集第5部、pp.15-16、1974.10