

論文 養生条件が膨張モルタルの圧縮強度と膨張特性に及ぼす影響

合田 寛基^{*1}・日比野 誠^{*2}

要旨：膨張性材料を用いたアルカリシリカ反応の模擬に関する基礎的研究として、温度と湿度を変化させた養生条件下でモルタルバーの膨張量を測定し、養生条件が膨張性材料の強度特性と膨張特性に及ぼす影響について検証した。この結果、珪酸質ガラスは材齢初期に膨張を呈さず、強度発現後、高温高湿下で長期間膨張する。石灰系膨張材は、常温低湿下では膨張せず、高温高湿下に移行すると急速に膨張が進行し短期間で収束する。また、実際のアルカリシリカ反応とは異なる特徴として、いずれの膨張材料とも膨張量の増加にともない圧縮強度と静弾性係数が増加した。

キーワード：アルカリシリカ反応、珪酸質ガラス、石灰系膨張材、養生条件

1. はじめに

近年、国内ではアルカリシリカ反応(以下、ASR)を主としたアルカリ骨材反応による被害が報告¹⁾²⁾されており、中でも橋脚に多く見られる鉄筋破断³⁾については、その原因解明と補修補強の対策が急がれている。また、同反応に起因する膨張やひび割れによって、コンクリート桁のキャンバーの増大やPC部材のプレストレスに与える影響についても検討が必要とされている。反応性骨材を用いた同反応に関する研究は多数報告されている⁴⁾が、膨張をともなった物性の変化が顕在化するまでの反応期間は比較的反応速度の大きい骨材でも数年を要することから、膨張にともなう強度特性の変化や付着特性の変化については十分に明らかにされていない。さらに、反応性骨材にはペシマム量が存在するとともに、採取時期や採取場所により材料物性に違いがあるため、所定の膨張が得られないことも多い。以上のことから、ASRの膨張挙動が構造物に対する影響を短期間に検討するのは困難である。

そこで筆者らは、ASRによる構造物の変形やひび割れによる影響など検証すべき項目につい

て短期的に再現性が得られる膨張性材料の開発ならびに実験方法の提案を目的とした研究を行っている。この際、膨張にともなう部材の変形を検証する上で、コンクリートの膨張特性ならびに鋼材との付着特性について把握しておく必要がある。しかしながら、多くの膨張性材料は強度の発現と同時に膨張することから実際のASRのように強度発現の後に膨張することがなく、付着特性が異なると予測される。付着特性には主に圧縮強度が関係することから、模擬の際にはまず膨張と圧縮強度の変化についてASRに近い特性を示す材料特性を得ることが求められる。

本報ではその基礎的研究として、膨張材料に珪酸質ガラスと石灰系膨張材を使用し、材料作成を考慮した養生条件の提案を試みるとともに、同材料の膨張特性と強度特性との相関性について検討を行った。

2. 膨張特性の比較実験

2.1 目的および実験方法

ASRの膨張特性を模擬する上で、膨張性材料の反応時期や膨張速度の調整が可能な実験方法

*1 九州工業大学大学院 助手 工学研究科機能システム創成工学専攻 工修(正会員)

*2 九州工業大学 助教授 工学部建設社会工学科 工博(正会員)

表—1 セメントならびに石灰系膨張材の成分表

項目	密度	ブレン	強熱減量	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃
単位	g/cm ³	cm ² /g	wt. %	wt. %					
普通ポルトランド	3.16	3300	1.9	21.9	5.2	3.0	63.6	1.6	2.0
石灰系膨張材	3.14	3500	0.4	9.6	2.5	1.3	67.3	0.4	18.0
石灰系静的破砕剤	3.21	-	1.2	8.4	2.1	1.1	82.2	0.6	4.2

表—2 珪酸質ガラスの成分表

項目	密度	粗粒率	SiO ₂	Al ₂ O ₃	B ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O
	g/cm ³		wt. %				
珪酸質ガラス	2.21	4.5	80.7	2.2	12.9	3.8	0.4

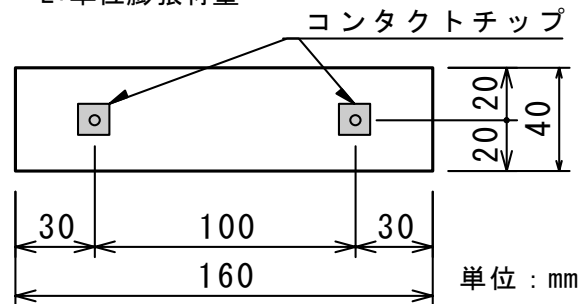
表—3 供試体種別

供試体種別	膨張材料	混入量	養生期間	
			1次	2次
普通モルタル	無混入	無混入	1日	28日
			14日	
ガラス系モルタル	珪酸質工業用ガラス	細骨材全置換	1日	
			7日	
			14日	
			14日	
ガラス系モルタル	細骨材50%置換	50kg/m ³	1日	
			14日	
			14日	
			14日	
石灰系モルタル	石灰系膨張材	50kg/m ³	1日	
			14日	
	石灰系静的破砕剤	50kg/m ³	1日	
			14日	

表—4 配合

供試体種別	W/C	W	C	S	E
	%	kg/m ³			
普通	50	282	564	1369	0
ガラス(100%置換)	50	282	564	0	1191
ガラス(50%置換)	50	282	564	684	596
石灰系膨張材 石灰系静的破砕剤	50	280	559	1339	50

ここに、W/C:水セメント比、W:単位水量、
C:単位セメント量、S:単位細骨材量、
E:単位膨張材量



を提案する必要がある。さらに鋼材を配置した実験を行う際には、その付着特性や部材の剛性について把握する必要があり、圧縮強度や静弾性係数の変化を調べることが重要となる。

本実験では、モルタルを用いて養生条件が膨張特性に及ぼす影響について、膨張の開始・収束時期、膨張速度ならびに膨張量と強度特性との相関性に着目した検討を行った。膨張性材料には、工業用の珪酸質ガラス、石灰系膨張材ならびに石灰系静的破砕剤を使用した。各膨張材料の成分ならびに供試体種別を、それぞれ表—1、表—2、表—3に示す。配合は、単位水量 $W=170\text{kg/m}^3$ 、水セメント比 $W/C=50\%$ 、細骨材率 $s/a=45\%$ とするコンクリートを基にブレンモルタルの配合を決定した。珪酸質ガラスは、ブレンモルタルの細骨材と容積置換すること

とし、その置換率を50%、100%の2種類に設定した。石灰系膨張材は、一般に $30\sim 60\text{kg/m}^3$ の混入量でコンクリートの収縮低減作用が認められる材料を用いた。混入量の決定にあたり、気中養生中にモルタルが過度の収縮を生じないかを確認した上⁵⁾で、 50kg/m^3 を混入量とした。石灰系静的破砕剤については、養生中に過度の膨張によって自己崩壊が発生しないことを確認した上で 50kg/m^3 を混入量とした。モルタルの配合を表—4に示す。

供試体は、 $40\times 40\times 160\text{mm}$ のモルタルバーを

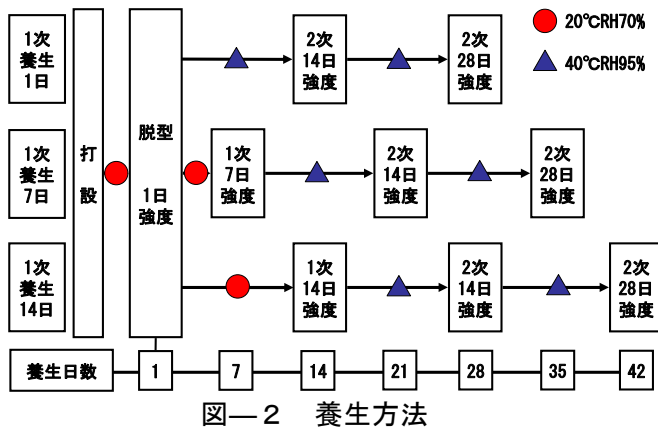


図-2 養生方法

使用した。供試体の作製方法は、4リットルを1バッチとし、全材料を一括投入した後にハンドミキサーで3分間練り混ぜ、型枠に打設する方法とした。供試体は、モルタル表面の乾燥を防止する目的で湿布により型枠を被覆し、24時間後に脱型した。膨張量の測定はマイクロストレインゲージを用いて行い、基長に対する増減率を膨張率とした。真鍮製コンタクトチップは、供試体の中央部に図-1に示すとおり配置した。

供試体の養生方法は、図-2に示すように20°C、RH70%の1次養生と40°C、RH95%の2次養生の2種類である。なお、本論文では、打設からの養生期間を総養生期間と表し、1次養生ならびに2次養生と区別している。

圧縮強度ならびに静弾性係数は、供試体ごとにφ50×H100mmの円柱供試体を3本用いて測定した。

2.2 実験結果ならびに考察

2.2.1 膨張率の経時変化

図-3ならびに図-4は、珪酸質ガラスにおける膨張率の経時変化を示す。珪酸質ガラスは、いずれも総養生期間1週間はほとんど膨張していない。しかし、1次養生期間が長いものでも2次養生へと移行した直後に膨張率が急増し、1次養生の短いものに近づく傾向が見取れる。総養生期間28日目では置換率100%の供試体で約0.08%、置換率50%の供試体で約0.03%であった。この時点で膨張率は収束しておらず、反応が継続していると考えられる。また、置換率

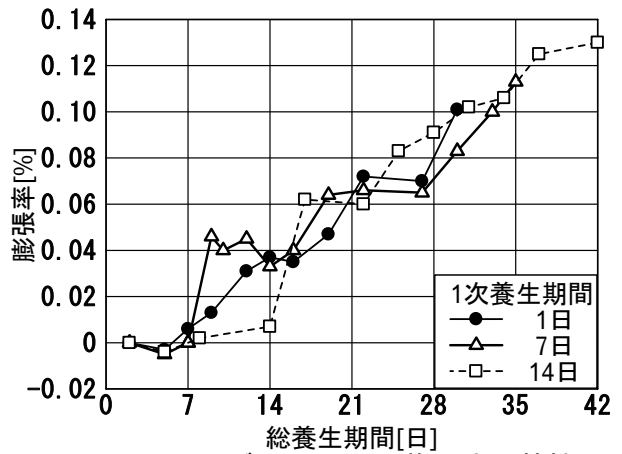


図-3 ガラス100%置換の膨張特性

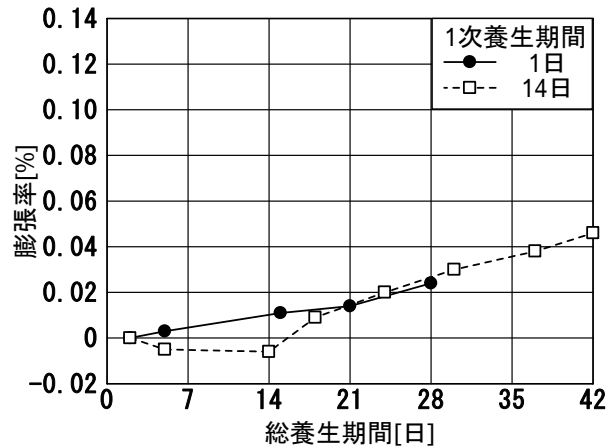


図-4 ガラス50%置換の膨張特性

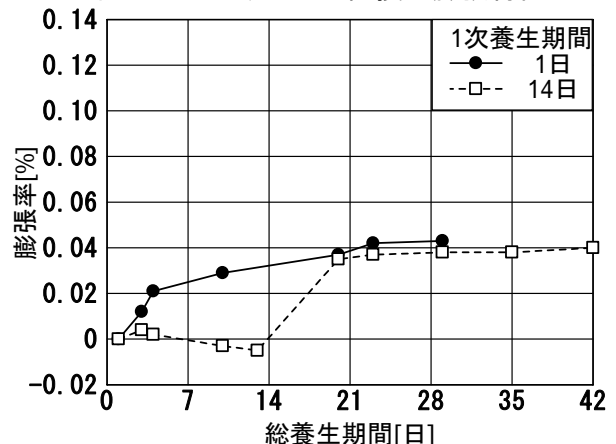


図-5 石灰系膨張材の膨張特性

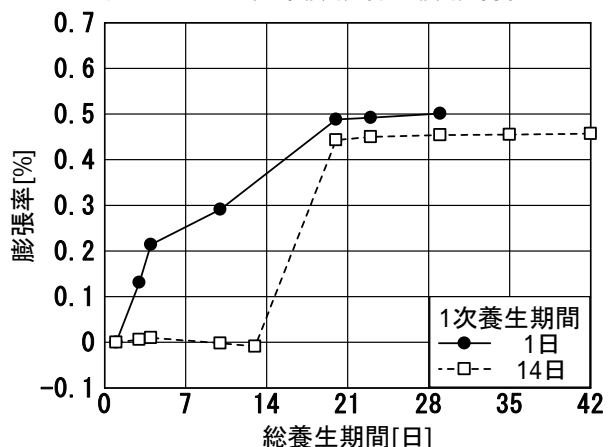


図-6 石灰系静的破碎剤の膨張特性

が及ぼす膨張率への影響をみると、置換率が大きいほど膨張率が大きくなるが見て取れる。以上より、珪酸質ガラスは中長期的に反応ゲルの生成反応とその吸水膨張作用が進行する材料であることが確認された。

図-5、図-6は、それぞれ石灰系膨張材ならびに石灰系静的破砕剤における膨張率の経時変化を示す。総養生期間28日目で石灰系膨張材が約0.04%であったのに対して、石灰系静的破砕剤は0.5%と非常に大きい膨張率を示した。総養生期間21日目にはいずれも膨張は収束した。珪酸質ガラスの膨張特性と比較すると、1次養生期間中にほとんど膨張を呈さない点や総養生期間28日目の膨張率が1次養生期間に影響されない点は類似している。一方、1次養生期間に関わらず、2次養生に移行した際に直ちに反応が進行し膨張する点や、短期間で収束する点が異なっている。以上より、本実験条件の下では、石灰系膨張材は珪酸質ガラスよりも膨張率が大きく短期間に膨張が収束することがわかった。

2.2.2 2次養生期間中の膨張速度

本節では、2次養生期間における週単位の膨張率の変化を膨張速度と定義し、1次養生期間と材料種別が膨張特性に及ぼす影響について比較した。

図-7は、置換率100%の珪酸質ガラスにおける膨張速度の変化を示す。2次養生1週目の膨張速度は、1次養生期間が1日ではほぼ0mm/週である。7日、14日と長期化するにつれて、0.033%/週、0.052%/週と増大している。以上より、1次養生期間の違いは2次養生1週目の膨張速度に影響する。これは、総養生期間中に生成される反応ゲルの量とモルタルの圧縮強度に影響を受けるためと推察される。また、いずれも2次養生期間4週目で膨張速度が約0.03%/週を示している。図-8に示す置換率50%の珪酸質ガラスは、置換率100%と膨張速度が異なるものの、養生期間の経過にともなう速度変化の特徴は概ね同じであった。

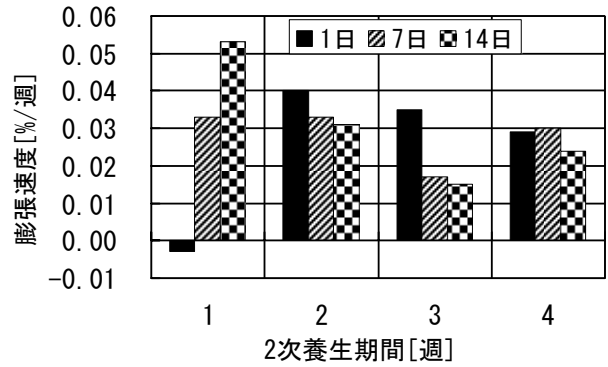


図-7 2次養生時における膨張速度 (ガラス100%置換)

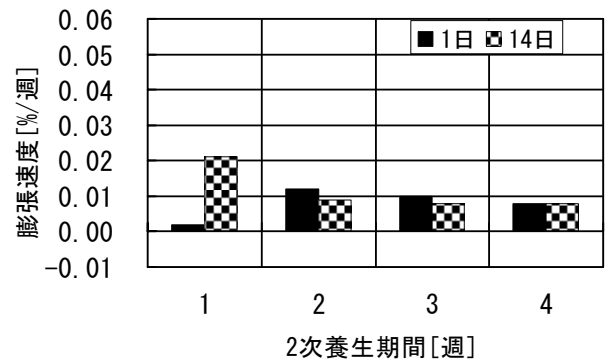


図-8 2次養生時における膨張速度 (ガラス50%置換)

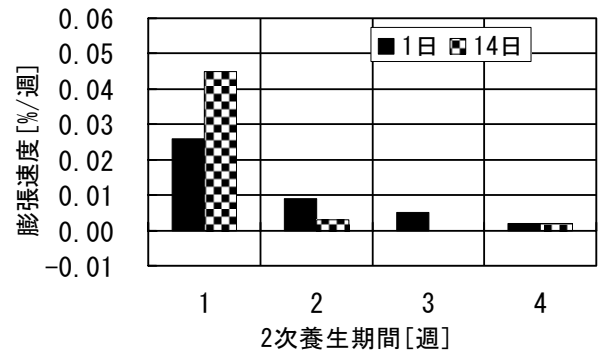


図-9 2次養生時における膨張速度 (石灰系膨張材)

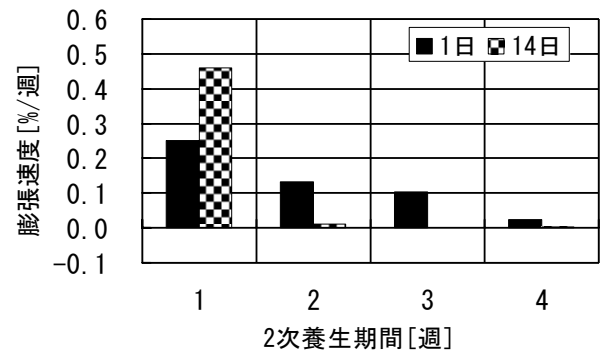


図-10 2次養生時における膨張速度 (石灰系静的破砕剤)

以上より、珪酸質ガラスは1次養生期間によって2次養生初期の膨張速度を変化させることが可能で、4週以上にわたり安定した膨張速度が期待できる材料であることがわかった。

図-9ならびに図-10は、それぞれ石灰系膨張材と石灰系静的破碎剤における2次養生期間中の膨張速度の変化を示している。石灰系膨張材は珪酸質ガラスと異なり、全供試体において2次養生1週目から大きな膨張速度を示した。特に1次養生を14日とした場合には、膨張速度が2, 3, 4週目より卓越しているのが見て取れる。膨張速度を比較すると、CaO量と膨張速度には相関が見られる。また、2次養生4週目ではほぼ0%/週を示した。

以上より、石灰系膨張材ならびに石灰系静的破碎剤は、1次養生期間が2次養生初期の膨張速度に影響を及ぼすことはなく、2次養生1週目に大きな膨張速度を示した後は、大幅にその速度が低下する性質を有する。

2.2.3 圧縮強度と膨張量の関係

本節では、膨張量と圧縮強度ならびに静弾性係数との相関性について考察を行った。

図-11に置換率100%の珪酸質ガラスと石灰系膨張材における、1次養生終了時の圧縮強度と2次養生14日目時点での膨張量との関係を示す。図中の数字は1次養生日数を表す。同図より、いずれも1次養生終了時の圧縮強度が大きい供試体ほど膨張率が大きくなった。図-12に示す静弾性係数についても圧縮強度と同様に、いずれも1次養生終了時の静弾性係数が大きいほど膨張率も大きくなった。これは、1次養生期間が短いと圧縮強度と静弾性係数が小さいため、モルタル組織が緻密でなく空隙や脆弱なマトリクスが比較的多く存在し、生成されたゲルの充填されるスペースが増加したことによるものと考えられる。しかしながら、この原因を特定するには本実験だけでは不十分であることから、それぞれの細孔溶液の分析ならびに組織構造の観察を行い、養生条件の変化と物性の

変化との相関性を理論的に説明することが必要であると考えられる。

図-13は、置換率100%の珪酸質ガラス、石

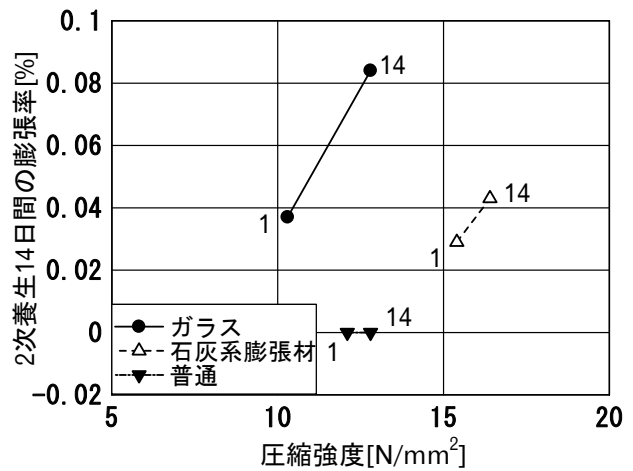


図-11 1次養生終了時の圧縮強度と2次養生中の膨張量の関係

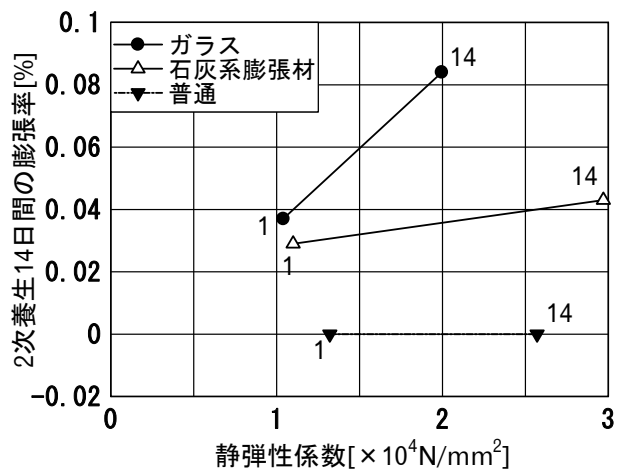


図-12 1次養生終了時の静弾性係数と2次養生中の膨張量の関係

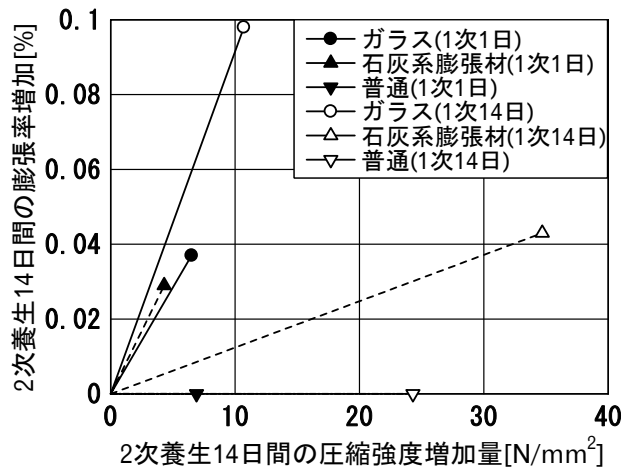


図-13 2次養生14日間の膨張量と圧縮強度の変化

灰系膨張材および普通モルタルにおける2次養生14日間の膨張率と圧縮強度の増加率を示す。同図より、珪酸質ガラスならびに石灰系膨張材のいずれも、2次養生期間中では膨張率が増加するにしたがい圧縮強度も増加した。特に石灰系膨張材は普通よりも大きな強度増加を呈した。また、1次養生期間が長いほど膨張率と圧縮強度が増加した。

図-14は、置換率100%の珪酸質ガラス、石灰系膨張材ならびに普通モルタルの圧縮強度と静弾性係数を同じ養生条件の普通モルタルの値で除したものである。既往の研究¹⁾⁶⁾より、ASRによって劣化したコンクリートでは、圧縮強度の低下よりも静弾性係数の低下が大きい傾向にある。本実験では、珪酸質ガラスを用いた場合にASRと似た特徴がみられた。石灰系膨張材は、圧縮強度と静弾性係数の変化量はほぼ同じであり、ASRとは異なる特徴を示した。

本実験より、珪酸質ガラスと石灰系膨張材について養生条件が膨張特性に与える影響やASRとの類似性について定性的に把握できた。同時に、両材料ともに圧縮強度と膨張率に正の相関がみられ、実際のASRにおける膨張特性と異なる点も確認された。

3. まとめ

本実験から得られた知見を下記に示す。

- (1)珪酸質ガラスは、反応ゲルによる膨張の顕在化に最短でも1週間を要し、40°C、RH95%下では長期間にわたりほぼ一定の膨張速度で反応が進行する。
- (2)石灰系膨張材ならびに石灰系静的破砕剤は、40°C RH95%の養生下で膨張率が急増するが3週間以内で膨張は収束する。
- (3)珪酸質ガラスならびに石灰系膨張材は、膨張開始直前の強度が大きいほど、その後の膨張率も大きくなる。
- (4)珪酸質ガラスや石灰系膨張材は、促進養生によって膨張率の増加とともに圧縮強度も増加する。

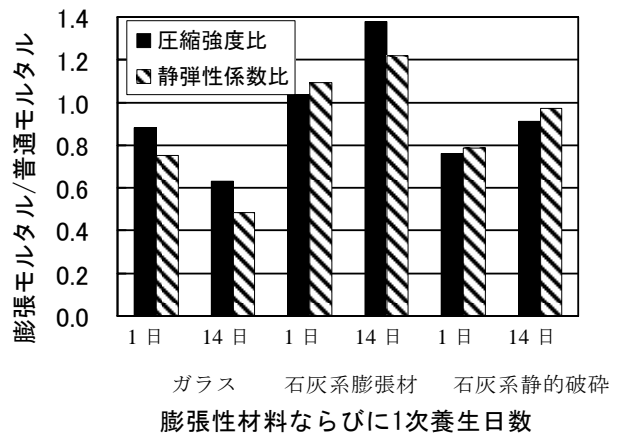


図-14 普通モルタルに対する圧縮強度・静弾性係数の比(2次養生14日時点)

- (5)珪酸質ガラスは、実際のアルカリシリカ反応と同様に圧縮強度の低下よりも静弾性係数の低下が大きい。石灰系膨張材ではその傾向はみられなかった。
- (6)養生条件によって細孔溶液の成分や組織構造がどのように変化しているかを明らかにする必要がある。

参考文献

- 1)小林一輔ほか：コンクリート構造物の耐久性診断シリーズ2 アルカリ骨材反応の診断，森北出版，1991
- 2)杉江功ほか：アルカリ骨材反応によるRC床版の損傷，コンクリート工学年次論文報告集，vol.16, No.1, pp.1111～pp.1116, 1994
- 3)中島俊和ほか：ASR膨張がコンクリート構造物の鉄筋破断に与える影響，コンクリート工学年次論文集，vol.25, No.1, pp.1111～pp.1116, 2003
- 4)小林一輔ほか：アルカリシリカ反応によるコンクリートの膨張挙動とゲルの組成，コンクリート工学年次論文集，vol.11, No.1, pp.87～pp.92, 1989
- 5)高膨張材料の特性とその応用，九州橋梁・構造工学研究会，1999
- 6)立屋敷久志ほか：大型供試体によるアルカリ骨材反応の劣化特性，コンクリート工学年次論文報告集，vol.12, No.1, pp.801～pp.806, 1990