コンクリート工学年次論文報告集，Vol.14，No.1，1992

論　文

[1109]　容積直接測定法によるアルカリ骨材反応の評価法と膨張特性に関する研究

正会員　○小倉　盛衛（関東学院大学工学部）
相澤　宏明（関東学院大学大学院）

1．まえがき

アルカリ骨材反応(以下、アル骨と略称する)の簡便な評価方法としては従来モルタルバー法またはコンクリートプリズム法によって判定するのが一般的である。この方法はあくまでも簡便な間接判定法であって、乾燥収縮試験における容積変化試験の手法を代用したものである。したがって、体積変化を直接測定することによって判定することが望ましいことは言うまでもない。

本研究は空気中重量と水中重量との差により供試体の体積変化を直接測定することにより、アル骨に起因する膨張特性を検討したものであり、従来の長さ変化試験との対比を行うことによって、本試験方法によった場合には従来より不明とされている種々の異常現象を極めて的確に把握することの可能性が高いことを証明しようとしたものである。結果によれば、膨張量は従来の長さ変化試験方法に比較して４倍程度にも達するばかりでなく、モルタルまたはコンクリートの膨張は収束する傾向が認められず、長期にわたって進行する可能性が高いことを明らかにしている。

写真－１　長さ試験測定装置

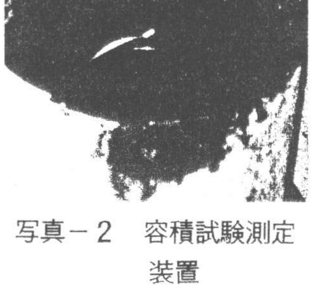
2．使用材料、配合および実験方法

養生方法は40℃の水中促進養生とし、測定前日に20℃に冷却して測定を行った。体積変化の測定に際しては測定前1時間位に20℃の水中に浸漬し、まず水中重量を測定した後に空気中重量を測定した。これは水中重量測定時の気泡の付着による誤差を避けるためである。JISモルタルバーの測定装置を写真－１に、水中重量の測定状態を写真－２に示す。

長さ変化試験の初期値は材令１日の脱型時をもって決定し、体積変化については20℃水中で１週間養生を行った時点で決定した。

セメントは市販の普通ポルトランドセメントであって、アルカリ量はR_2O=0.72%である。実験の一部に用いた高炉水砕スラグ微粉末はブレーン値で5,950cm²/g、比重2.90、塩基度1.86のものである。

骨材は山形安山岩で細骨材および粗骨材の比重はともに2.72であって、吸水率は0.2%の砕石であり、火山ガラス分を40%程度含む極めて反応性の高い岩石である。試験に用いた砕砂のFMは2.47であるが、これを洗浄した場合のFMは3.02である。これは同一試料において岩石の微粉分の混入の影響について検討することを目的としている。一部の試験においては潜晶質石英からなるチャートの砕砂を用いたが、これはアルカリシリカ反応に起因する膨張が比較的緩慢であるとされる岩石についても本容積測定法によって比較検討することを目的としている。チャートはFM=



写真－２　容積試験測定装置

3.30、比重=2.61、吸水率=0.84%のものを使用した。

モルタルの配合は単位水量281g/ℓ、水セメント比45%、単位細骨材量1404g/ℓである。コンクリートの配合は単位水量203kg/m³、水セメント比45%、細骨材率40%であり、スランプが10cm程度となるよう試験練りによって決定した。配合は高強度を要する土木構造物を想定して決定した。

コンクリートに用いた骨材は全て山形安山岩である。試薬特級のNaOHを練り混ぜ水に混入し、セメント重量に対するR_2Oを最大で1.45%まで変化させた。

3．実験結果および考察

3-1 モルタルの膨張性状および長さ変化

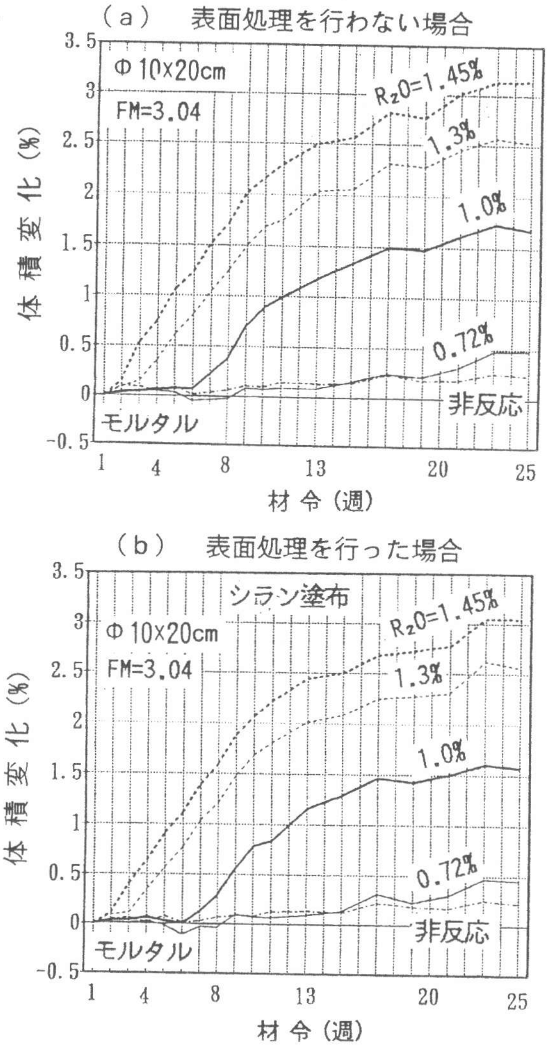
図－1および図－2に円柱状モルタル供試体およびJISモルタルの測定結果を示す。図－1(b)は水中養生1週後に供試体表面にシラン系含浸塗料（以下、シランと略称）を塗布して表層部のセメントペーストの溶解が測定結果に及ぼす影響について表面無処理の図－1(a)の結果と比較検討した。

結果によれば、表面処理の有無にかかわらず測定値には大差が認められず、シラン塗布の場合に膨張量がわずかに小さく、膨張の時期もわずかに遅れる程度　となっている。また、吸水量においてもほとんど同等の値を示したので、表層部が相当に軟弱な場合を除き表面処理の必要性がないようである。

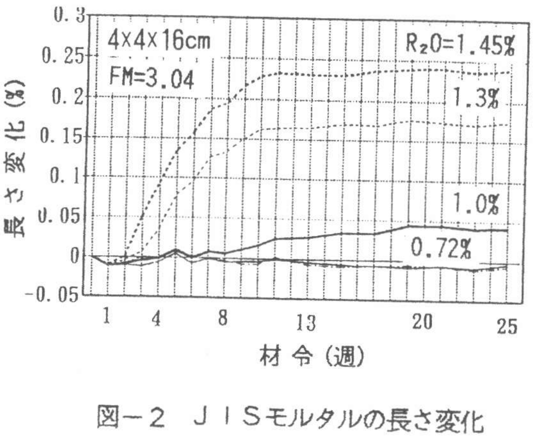
さらに、膨張量は体積変化で３%強に達しており、仮にこの値の1/3を線膨張量と仮定して比較しても膨張量は図－２に示したJISモルタルにおける膨張量の４倍程度にも及んでおり、さらに、比較的アルカリ量の少ないR_2O=1.0%のケースにおいて、モルタルバー法では非反応性と判定されるものが体積変化では異常に大きな膨張量が観察され、従来のモルタルバー法によって骨材の判定を行う場合は大いに検討の余地が残っていることを示している。

膨張の速度が非常に速くなる時期はクラックの発生時期と符号しており、モルタルバーの膨張が収束した材令以降においても体積は継続的に膨張している。グラフの升目の大きさを考慮すると、膨張は非常に速い速度で長期に亙って進行するようである。

アルカリ無添加のセメントを用いて非反応性の骨材を使用した場合にも体積膨張は長期材令に亙って進行する傾向が認められるので、本試験法によって骨材が有害な反応性のものであるかどうかを判定



図－1　モルタルの容積変化



図－2　ＪＩＳモルタルの長さ変化

する場合には新たに基準を設定する必要があろう。以上の供試体についての吸水性状を図－３(a)および(b)に示したが、これらの結果は膨張量とほぼ見合った値となっている。

図－４に材令25週におけるR_2Oと体積変化との関係を示す。これによれば体積変化はR_2Oと極めて高い比例関係が認められており、特定のR_2O量を境にして膨張量が急激に大きくなることはないことが分かる。これらは既報のモルタルバーによった結果〔1〕とは異なったものとなっている。岩石中に含まれるシリカ質の成分が液相中のアルカリ濃度に比例して溶解度が高くなることは極めて常識的に理解できることであり、本容積変化試験法により得られた結果は供試体内部で生じていると考えられる化学反応と非常に高い相関関係を有していると思われる。

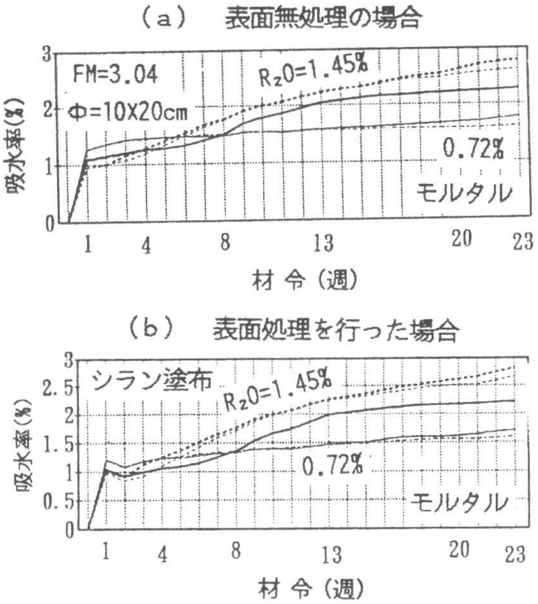
骨材が有害であるか否かの判定基準については、今後の研究成果とJIS A 5308の化学法との対比により慎重に検討する必要があるが、現時点での一応の目安を提示すれば以下のようになる。

つまり、R_2O量を1%程度として材令と体積膨張率との関係を求め、膨張速度が明らかに遅くなる材令において膨張率が1%を越える骨材を反応性とする。膨張率が1%を越える骨材については、アルカリ無添加のモルタルに膨張抑制材料などを混入して膨張率が0.5%以下の骨材を使用可とするのが妥当であろう。

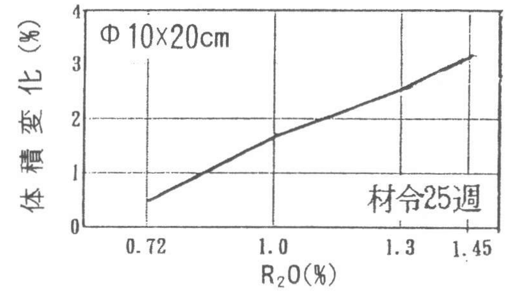
膨張率の上限値を非常に高く設定したのは、本容積法によった場合には大半の骨材が使用不可となる危険性が生ずるためである。また、3-4節で検討しているように、コンクリートの場合は同等のアルカリ水準において膨張率が1/2程度になることから、モルタルによる基準値をかなり高めに設定することがより現実的であろうと思われる。

3-2 供試体の寸法、砕砂のFMおよび養生方法などが膨張性状に及ぼす影響

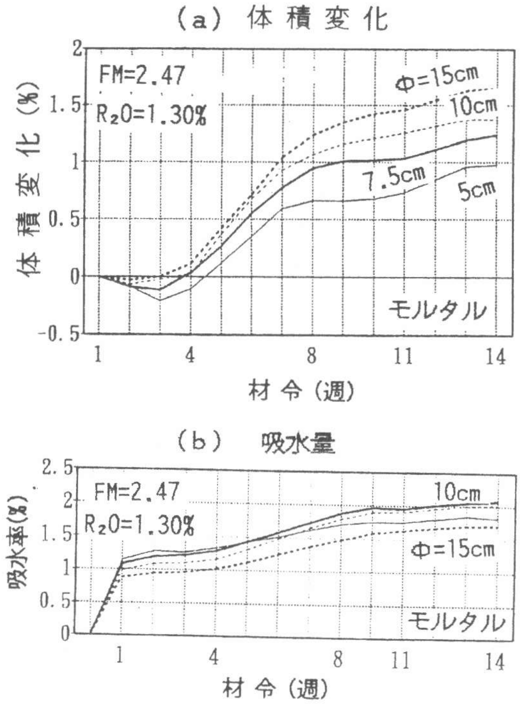
円柱供試体の直径をΦ5cm～15cmに変化させた場合の試験結果を図－５に示す。結果によれば、寸法の相違による体積膨張率の差が極めて明瞭に現れている。また、材令初期においては水中養生を行っているにも



図－３ 容積変化試験を行った供試体の吸水量



図－４ アルカリ量と膨張量の関係



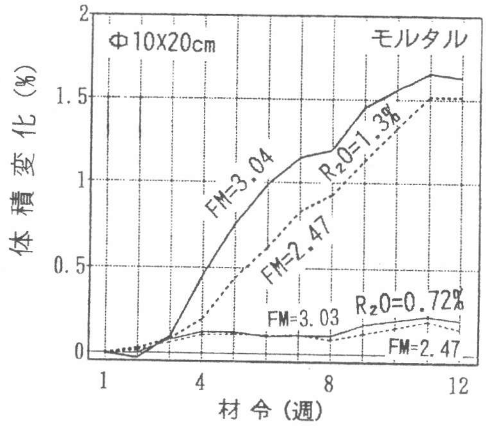
図－５ 供試体の寸法と膨張量の関係

かかわらず、体積が例外なく収縮している。これは初期における水和反応およびアル骨反応に起因する結晶水の取り込みに対して吸水が遅れ、見かけ上乾燥収縮を引き起こしたような現象が現れるためであろう。また、吸水量は寸法との相関関係が必ずしも認められず、Φ7.5cmおよび10cmのものが最も高くなっている。これは膨張に起因するひびわれの発生またはひびわれ中のゲルの溶出、充填、内圧の低下などと複雑に関係しており、吸水の影響がより卓越するものと考えられる。

図には表していないが、直径と膨張量との間には極めて高い比例関係が認められる。これは内圧を受ける厚肉円柱体のケースのように、供試体内部では拘束状態での膨張を引き起こし、寸法の大きなものほど引張応力を受ける領域が大きいためであろう。アル骨に起因する膨張圧は120kgf/cm²にも達するとの報告〔2〕があるので、上記の推論はほぼ正しいものと考えられる。

したがって、長さ変化試験のように、中心部に測定用チップを埋め込んで測定した場合には拘束状態での膨張量を測定したことになり、膨張の収束が比較的早く現れるために長さ変化試験によって得られた値の物理量が工学的にどのような意義を有するかにおいて大いに疑義を生ずるところであり、試験方法の抜本的な再検討が必要である。

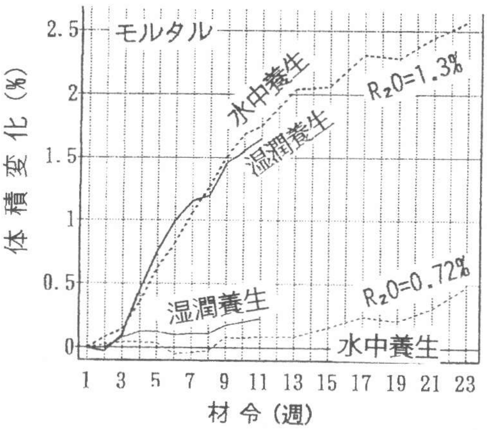
本試験の結果から考察すると、材令初期においてはアルカリシリカ反応に起因する膨張が卓越し、長期的にはひびわれに溶質したゲルの吸水膨張が卓越して現れると考えられる。特に、アルカリ分の多い場合には水酸化カルシウムの溶質が著しく、これが炭酸ガスと反応して炭酸カルシウムとなることは良く知られているが、水分および炭酸ガスが同時に存在する場合には液体としての炭酸水素カルシウムとなって容易に溶出し、これが乾燥することによってゲル状の炭酸カルシウムになることについては意外に知られていない。つまり、ひびわれの発生はこのような化学反応を容易ならしめる主要な要因となっており、長期的な膨張はむしろゲルの吸水膨張が卓越して現れると考えるのが妥当であろう。このように考えると、寸法が大きくひびわれが深い供試体は膨張量が一層顕著になると考えられる。



図－6　細骨材のＦＭと膨張性状

図－６に細骨材のFMと膨張量との関係を示す。これによれば従来の考え方とは傾向が異なっており、FMの小さい骨材ほど膨張量が小さい。これは微粉末が一種のポゾラン効果を示すためであろう。さらに、アルカリ分が少ない場合には、非反応性骨材および反応性骨材を用いたモルタルとの間で膨張量において大差が認められない。このことは反応性が高い骨材であっても微粉末分が適量混入するよう砕砂製造過程の工夫を行うことにより、非反応性の骨材とほぼ同質の骨材を製造することが可能であることを示唆している。

図－７に養生条件の相違、つまり水中養生と湿潤養生における膨張量の関係を示す。材令１１週に至るまでの結果では両者の間には大差が認められず、膨張性状は同様な傾向を示した。

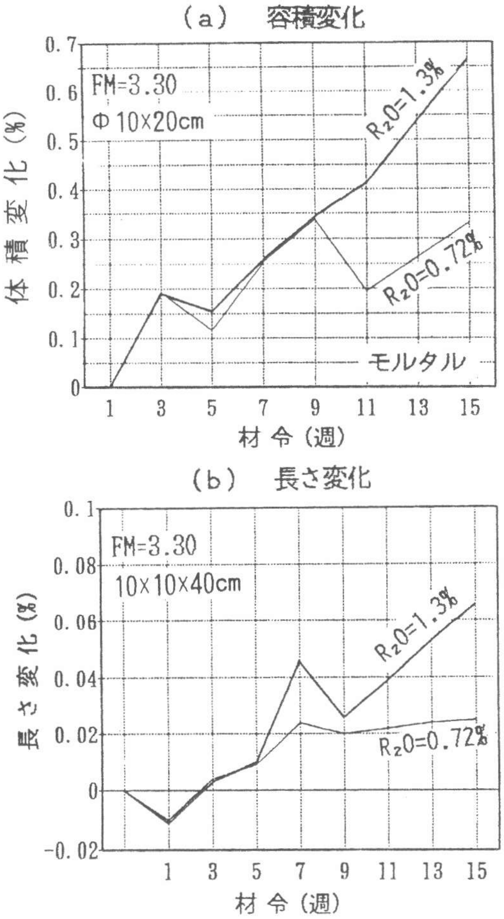


図－７　養生方法と膨張性状の関係

図－８（ａ）、（ｂ）に堆積岩系のチャートの体積

変化および長さ変化を示した。潜晶質石英からなるチャートは一般に膨張速度が遅いとされているが、体積変化試験の結果では材令初期より非常に大きな膨張性状を示した。反面、長さ試験によった場合は材令15週に至るまで有害と断定できるような　膨張量が観察されていない。チャートの砕砂は全体的に偏平なものが多く、繊維補強を行ったモルタルのような膨張抑制作用が微妙に関係していると考えられる。したがって、このような岩石については容積変化試験による判定のほうが非常に有利であると考えられる。

写真－3に材令初期の各供試体のひびわれ状態を示したが、円柱体は網目状のひびわれが発生して供試体が縦横に膨張していることを示している反面、角柱体は長手方向に直角なひびわれの発生が認められる。また、この角柱状供試体の打設面は長手方向に直線状のひびわれが発生しており、内部に発生していると考えられる圧縮応力と表層部に発生する引張応力が相互に作用を及ぼしていると考えられる。

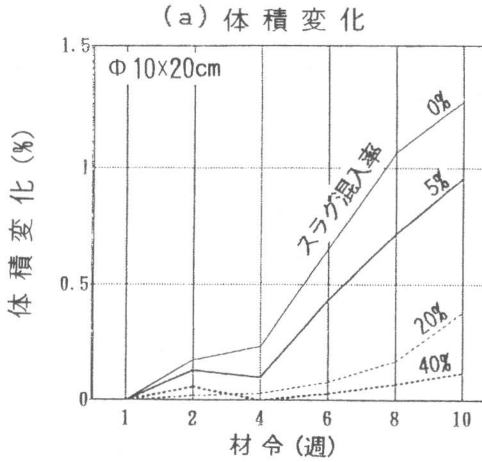


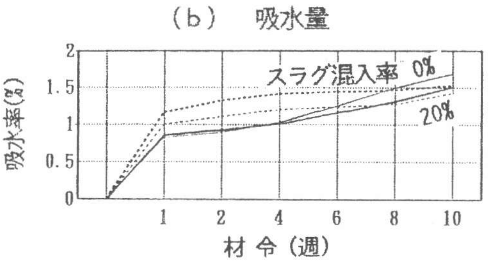
図－8　チャートの膨張性状

写真－3　供試体のひびわれ発生状況

3-3 高炉水砕スラグ微粉末混入の効果

図－9に示したものは山形安山岩の砕砂を用いてアルカリ量をR_2O=1.3%とした場合に、高炉水砕スラグ微粉末（以下、スラグと略称）添加の効果につき検討したものである。結果によればスラグ混入の効果は極めて顕著であり、図－10に整理して示したように著しい膨張抑制効果が認められる。加えて、本容積測定法によった場合はいずれの場合も顕著な膨張性状を示す





図－9　高炉スラグの混入が膨張性状に及ぼす影響

ため、現実のセメントのアルカリ量に近い水準で試験を行って結論を出すことが望ましく、この場合は比較的少量のスラグを混入することで十分の膨張抑制効果が期待できるものと推測される。

3-4 コンクリートの膨張性状

コンクリートについてもモルタルと同様の試験を行った結果を図－１１および図－１２に示す。図から明らかなように、コンクリートの場合についてもモルタルの場合と類似の結果が得られており、アルカリ量と膨張の関係が明瞭に現れている。コンクリートの場合は単位量当たりのアルカリ量が少なく、R_2O量の影響がモルタルの場合ほどには顕著に試験値に現れていない。吸水量も図－１１（ｂ）に示すように、膨張量にほぼ見合ったものとなっており、膨張と吸水との相関関係が明瞭である。

図－１１（ａ）および図－１２を比較検討すると体積変化は長さ変化の３倍強になっておりほぼ理論的な整合性が認められる。ただし、アルカリ分の少ない場合には体積変化が長さ変化に比較して著しく大きくなっており、現実のコンクリート構造物における水準のアルカリ量で試験を行う場合にも有意な結果が得られると考えられる。

以上の試験結果は、現場より採取されたコアなどにも適用することが容易であり、これらの試験結果からより汎用性の高いものとすることが可能となろう。

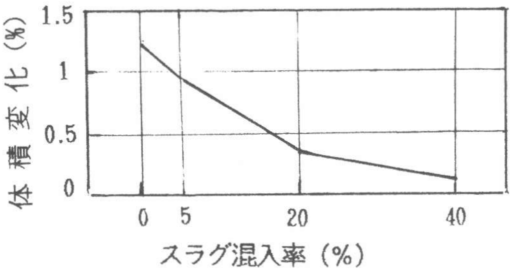
4．結　論

以上の体積変化試験による基礎的試験結果から以下のことが明らかになったものと考える。

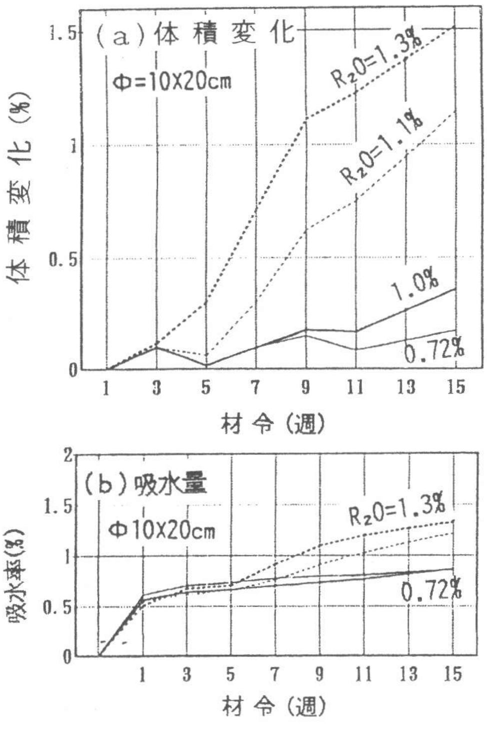
（１）本容積直接測定法はアルカリ骨材反応に起因する膨張性状を判定する上で極めて有効である。

（２）本法によって反応性骨材の判定を行う場合は、現実のセメントのアルカリ水準に近いをR_2O=１％程度で試験を行うことが望ましい。

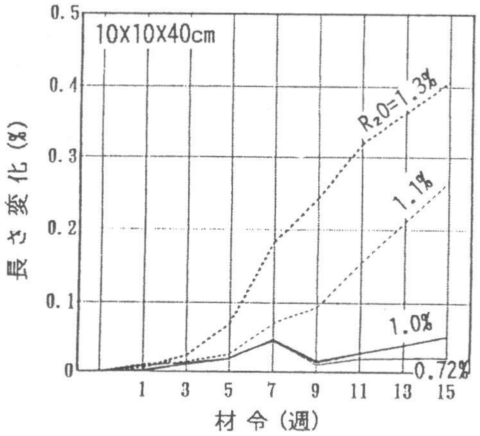
（３）膨張性状を検討する上において、水中養生による試験を行っても、十分に有意な結果が得られる。



図－１０　高炉スラグの混入率が膨張性状に及ぼす影響



図－１１　コンクリートの膨張性状



図－１２　コンクリートの長さ変化

参考文献

[1]Stanton,T.E.et al:California Experience with the Expansion of Concrete through Reaction between Cement and Aggregate,ACI Vol.13,pp.209,1942

[2]Pike,R.G.:Pressures Developed in Cement Pastes and Morters by Alkali-Aggregate Reaction, HRB Bull.172,pp.34,1957