

委員会報告

「コンクリート法によるアルカリ骨材反応判定試験方法研究委員会報告」

委員長 西林 新蔵 (鳥取大学)

コンクリート法によるアルカリ骨材反応判定試験方法研究委員会

〈委員長〉	西林 新蔵 (鳥取大学)	
〈幹事〉	鎌田 英治 (北海道大学)	宮川 豊章 (京都大学)
	森永 繁 (清水建設)	
〈委員〉	阿部 道彦 (建設省建築研究所)	魚本 健人 (東京大学)
	大野 定俊 (竹中工務店)	河野 広隆 (建設省土木研究所)
	田村 博 (日本建築総合試験所)	中野 錦一 (大阪セメント)
	能町 宏 (日曹マスタービルダース)	松藤 泰典 (九州大学)
	矢村 潔 (摂南大学)	

1. 委員会設立の背景と活動状況

コンクリート構造物の耐久性や耐荷力に重大な影響をもたらすアルカリ骨材反応は、1980年代に入って、わが国においても多くの発生事例が報告されるようになり、この現象に対する認識の不足とも相まって、社会的にも大きな反響を引き起す結果となった。

このような背景のもとに、日本コンクリート工学協会は、1983年に『アルカリ骨材反応調査研究委員会 (委員長岸谷孝一)』を設置し、以来5ヵ年にわたって共同研究、現地調査、討論を通じてこの現象に対する調査研究を実施し、その成果を「アルカリ骨材反応調査研究委員会報告書 (1989年7月)」にまとめて公表した。

本研究委員会は、上記委員会の分科会の一つである判定試験方法分科会の活動を受け継いで、1989年に設置されたものである。判定方法分科会においては、化学法 (JCI AAR-1)、モルタルバー法 (JCI AAR-2)の制定のほか、コンクリートそれ自体でアルカリ骨材反応性を試験する方法の開発を目的に調査研究を続けてきたが、試験方法を提案するまでには至らなかった。

本委員会における研究活動は、1989年4月に開始し1991年3月に完了する予定で行われ、各研究機関で作成された合計474種類にのぼるコンクリート供試体についての経年データを取りまとめ、よりの確な判定試験方法と判定基準を制定すべく審議を行った。この間12回の委員会と4回の幹事会を開催し、1991年3月には、2ヵ年間の活動の締め括りとして、『コンクリートのアルカリシリカ反応性判定試験方法 (案) (コンクリート法)』を提案するとともに「コンクリート供試体によるアルカリ骨材反応性判定試験方法に関するシンポジウム」を開催した。

ここでは、コンクリート法を制定するに際して検討された事項について概説する。なお、その詳細については、本委員会の最終報告書 (1991年7月発刊予定) に記述されているので参照されたい。

2. コンクリート法制定における問題点

(1) コンクリート法の理念

アルカリ骨材反応は、骨材だけがこれに関与するのではなく、セメントや混和剤さらには外部から供給されるアルカリと水分とが問題となる。一方、このアルカリ骨材反応を抑制する混和材料の存在も知られている。このようなことから、たとえ反応性であると判定された骨材であっても、コンクリートの配合によっては安全に使用できる場合もあり、それとは逆に、一定の条件のもとでは無害と判定された骨材であっても、その骨材の反応性の程度によっては、高アルカリの条件下で膨張を引き起す可能性がある。従って、厳密にコンクリートのアルカリ骨材反応性を判定するためには、実際のコンクリートに用いられる骨材とセメントや混和剤とを組み合わせ、すなわち、そのコンクリートの配合、ないしは実際に打設される生コンクリートについて検討されなければならない。

化学法 (JCI AAR-1) は骨材そのものの潜在的アルカリ骨材反応性の有無を判定するための試験であり、モルタルバー法 (JCI AAR-2) は骨材とセメントとを組み合わせた場合の有害性を判定するための試験である。これに対してコンクリート法は、これら両試験法の考え方をより実際に近付けた試験方法として考えることができる。

コンクリートによるアルカリ骨材反応性の試験では、長い期間にわたって生ずる反応を比較的短期間の実験室的試験によって推定する必要がある。また、判定に際して採用される限界値に対しては、材料の品質の変動を考慮した安全率が考慮されねばならない。

本委員会において検討が加えられたコンクリート法は、これらの問題を一定量のアルカリの添加と促進保存によって対応することを考えた。このうちアルカリの添加は、コンクリートのアルカリ骨材反応によって生じる膨張を促進させるが、過剰なアルカリの添加は非反応性骨材を使用したコンクリートを有害と誤判定する可能性もある。また逆に、アルカリの添加量が不十分であれば、反応性骨材が使用されていても限界値以下の膨張率となって無害と判定されるおそれがあり、このアルカリの添加量を定めることが重要な課題となった。

一方、アルカリ骨材反応を促進させるには、反応に最適の温度と十分な湿度の環境でコンクリートを保存しなければならない。この場合、温度と湿度条件の設定、さらには湿度の維持方法が重要な検討事項となった。

(2) アルカリの添加によって生じるコンクリートの物性の変化

コンクリート法では、実際のコンクリート、あるいはその配合のコンクリートについて試験を行うが、アルカリ骨材反応の有無の判定にはアルカリの添加が必要条件となる。添加アルカリの種類としては、今までに研究実績が多いNaOHとしているが、NaOHの添加によってコンクリートの基本的性質がどのように変わるかを詳しく調査しておく必要がある。前委員会で実施した共通試験においては、フレッシュコンクリート、硬化コンクリートについてNaOHの添加の影響が検討され、以下のような結果が得られた。

フレッシュコンクリートにおいては、過剰なNaOHの添加 (3kg/m^3 以上) やA E減水剤を使用した水セメント比が極めて低いコンクリートの場合を除けば、スランプや空気量に著しい影響を及ぼすことはなく、無添加の場合と同様にコンクリートを作成することができる。

硬化コンクリートにおいては、NaOHの添加は微小径の細孔量の増大をもたらし、圧縮強度を著しく低下させる (図-1参照)。このNaOHの添加量の増大に伴う強度低下は、引張強度の場合に

も認められるが、静弾性係数についてはこの傾向は見られない。

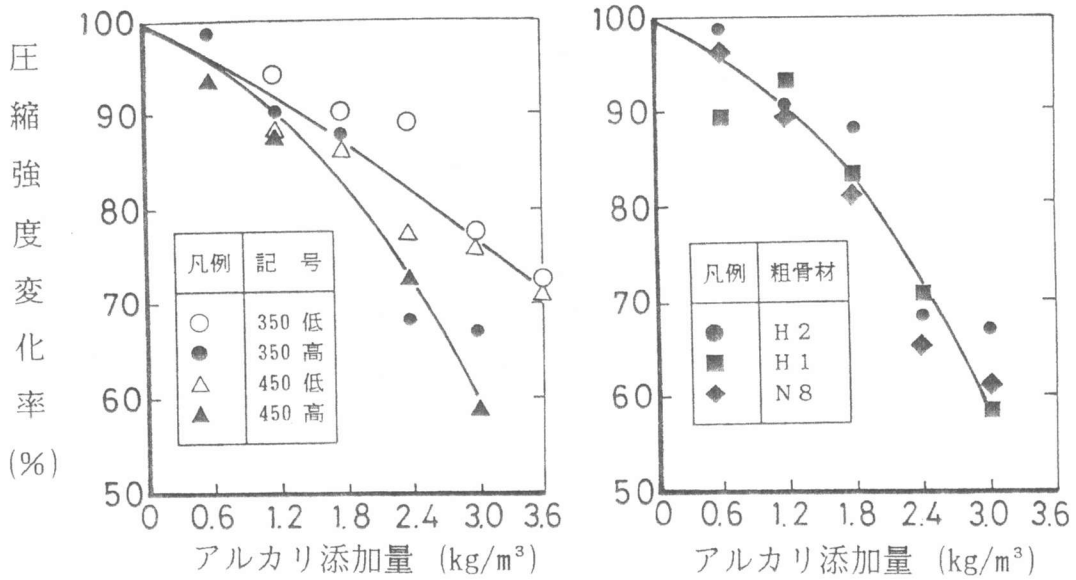


図-1 アルカリの添加にともなう圧縮強度の低下

(3) アルカリの添加量

反応性骨材が使用されたコンクリートの膨張は、そのコンクリートに含まれるアルカリの総量（単位アルカリ量）と密接な関係がある。アルカリ添加量を種々変えたコンクリートを作製して試験すると、単位アルカリ量がある一定値以下ではそのコンクリートでは膨張が生ぜず、その一定値を越えたコンクリートにおいては、単位アルカリ量に対応した膨張が生じることが認められている。

図-2 は、アルカリの添加量を 0.6kg/m^3 づつ変化させたコンクリートの膨張量を、図-3 はコンクリート 1m^3 中に含まれる総アルカリ量（単位アルカリ量）と膨張量との関係を、促進保存材令6ヶ月の段階で比較したものである。

図-2 から、明確な膨張が現れるのに要する添加アルカリ量は、セメントに含まれているアルカリ量が多い場合には少なく、それとは逆にセメント中のアルカリ量が少ない場合には多くなっていることが分かる。一方、図-3 からは、明確な膨張が現れる段階におけるコンクリート中の単位アルカリ量は、セメント中のアルカリ量の大きさに関係なくほぼ一定であることが分かる。つまり、反応性を判定しようとしている試験対象のコンクリートに含まれて

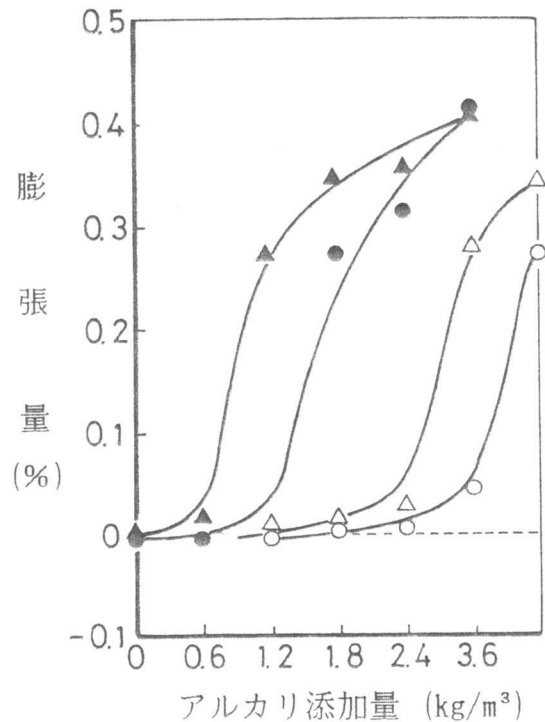


図-2 アルカリ添加量と膨張率との関係

いるアルカリ量と、アルカリの添加を行ったコンクリートの総アルカリ量（単位アルカリ量）との差の大小が試験の目的から重要となる。すなわち、この差が大きいほど試験対象のコンクリートの反応性は小さく、逆にその差が小さいほど反応性は大きいと判断される。換言すれば、この添加アルカリ量の大小が反応性に対する安全性の大小に対応することになる。

この差がどの程度の大きさであれば、試験対象のコンクリートを反応性なしと判定できるか、言い換えると、どの程度のアルカリ量を添加すればコンクリートの反応性を誤りなしに判定できるかについて、共通試験の結果をもとに種々の検討が行われ、その結果、後述するコンクリート法（案）においては、添加アルカリ量を 2.40kg/m^3 とした。

(4) 保存条件

委員会では、反応性が比較的大きい安山岩系の骨材を用いたコンクリートについて、 20°C および 40°C 、湿度 100%の促進保存と暴露条件での試験を行い、その際の膨張率の比較を行った。それによると、

- 1) 暴露試験で膨張の進展に明らかな差が認められた2種類の反応性骨材を使用したコンクリートを、 40°C と 20°C の促進試験で比較すると、暴露試験と同じ傾向は 20°C の保存条件の場合に得られた。
- 2) アルカリ量が極めて多い場合（総アルカリ量で 6.75kg/m^3 ）においても、 20°C の条件では材令5ヶ月頃までは膨張は現われず、一方、それと同じコンクリートであっても、 40°C の条件に置いた場合には、材令1、2ヶ月で大きな膨張が現われ、材令6ヶ月頃になると膨張の進行は緩やかとなった。
- 3) 40°C 、湿度 100%の促進条件で試験することによって、自然環境条件下の暴露試験よりは膨張の進行が促進されるが、暴露試験においても顕著な膨張は1年程度から観察された。

これらの結果から、実際の環境条件に近付けるためには、極端な温度条件を採ることに問題がある一方で、反応性の判定を早期に行う目的からすると 20°C の条件にも問題があり、結局のところ、反応を促進する温度条件として 40°C を採用することとした。この条件で共通試験を実施したところ、湿度条件が結果のばらつきに大きく影響することが判明したので、保存における湿度管理の問題について検討を加えることにした。

水中保存は、供試体を一定の湿度条件で管理するのに最も適している。しかし、実験の結果、水中保存中にアルカリの溶出が無視できないほどの量となることが明らかになった。従って、促進試験中に結露水が常に滴下するような保存条件や、それとは逆に、供試体が乾燥するような保

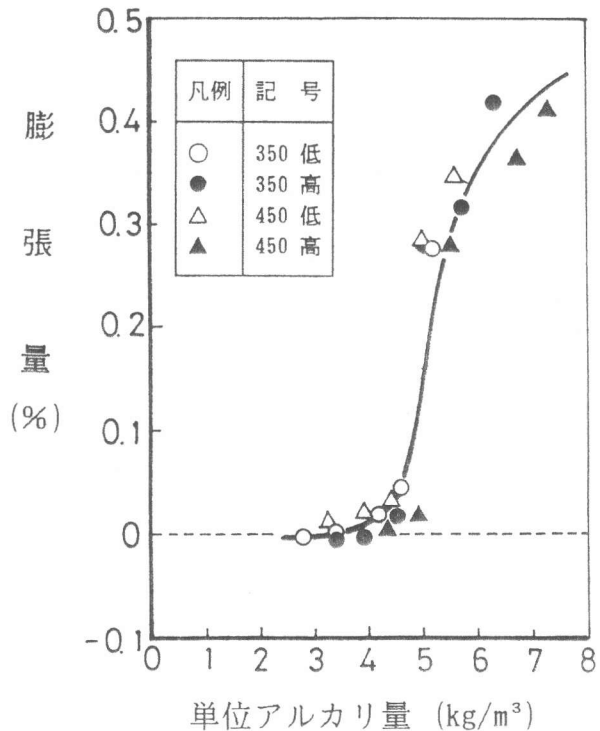


図-3 単位アルカリ量と膨張率との関係

存条件は望ましくない。このため、コンクリート法における湿度条件を厳密に一定にする方法として、それぞれの供試体を一定量の水分を含ませた湿布で覆い、密閉容器に入れた後、容器ごとに40℃の条件で保存する方法を促進試験条件として採用することになった。なお、この方法を湿布封緘法と称し、湿布としては十条キンバリー社キムテックスを、密閉容器としてはポリエチレン袋の中に入れた後多湿ボックス中にて保存することを推奨している。

(5) 供試体寸法

供試体寸法がアルカリ骨材反応によるコンクリートの膨張に影響するとのデータがしばしば報告されている。

そこで委員会においては、7.5 × 7.5 × 40cmと10 × 10 × 40cmの寸法の供試体における膨張量の違いを、同一配合のコンクリートによって検討した。その結果、温度と湿度条件が正しく設定されている限り、両者の間には測定誤差を上回るような大きな差はないものと判断された。また、それぞれの寸法の供試体間のばらつきにも有為な差は認められなかった。これらの結果を参考にして、コンクリート法においては、7.5 × 7.5 × 40cmと10 × 10 × 40cmの寸法の供試体のいずれを用いてもよいことにした。なお、断面寸法7.5 × 7.5 × 40cmの供試体においては、試料の量、供試体の重量、保存槽の大きさなどを小さくすることができ、測定時の取扱が著しく容易となることの利点があるとの指摘もあった。

(6) 反応性の判定基準について

アルカリ骨材反応によるコンクリートの膨張を劣化の判断基準とする場合、それによって生じるひびわれが問題となる。共通試験の結果によれば、最初にひびわれが観察された際の膨張率は、0.05～0.10%の場合が最も多くなっているが、観察者によって、あるいは測定間隔が1ヵ月毎であることから、膨張の進行速度によってはかなりのばらつきのあることが認められた。また、一旦膨張が始まるとその後の膨張はかなり急激に進行し、そのため1ヵ月毎の測定では0.05%から0.10%の間の膨張率が測定されることが少なくなることを考えると、ひびわれから劣化の程度を判断するための膨張率の基準値を0.05%とするか、あるいは0.10%にするかはそれほど重要な意味を持たないことになる。

また、本委員会で提案するようなアルカリの添加によって反応を促進させる試験法においては、反応性の判定基準となる膨張率としては、膨張が生じたことを明確にかつ誤りなく判定できる値が望ましい。そこで、本委員会においては、この判定基準値を6ヵ月で0.10%と定めた。

3. 今後の検討課題

本委員会の活動期間が2ヵ年と限定され、かつコンクリート法の制定が最重点項目であったため、委員会における議論の過程で問題となった点で、今後の検討課題として残された項目がある。

(1) アルカリ添加量と膨張率との関係

一般に、アルカリ添加量、ないしはコンクリート中の総アルカリ量が増大するのに伴って膨張率が増加することが認められているが、アルカリの増量によってかえって膨張率が低下する、いわゆるアルカリベシマムが存在することも考えておかなければならない。現に、本委員会が取扱った合計474種類のコンクリートの配合の中に、ただ1種類だけであるが、このアルカリベシマムの存在が確認された。

このアルカリペシマムの存在による反応性の誤判定を防ぐには、添加アルカリの量を2ないし3水準を選んで試験を行うことが望ましい。

(2) 遅反応性

コンクリートのアルカリ骨材反応性を促進試験によって判定する場合、判定基準材令における膨張が、長期間保存した後に生ずる膨張とどのように対応しているかを確認しておくことが望ましい。これは、とくに判定基準材令以降において膨張が急激に進展する、いわゆる遅反応性（late expansion）の骨材（チャート系骨材の中にはこのような遅反応性のものがある）が使用されたコンクリートにおいて問題となり、このような遅反応性コンクリートにおいてもアルカリの添加によって反応が促進されるかどうかを詳しく検討しておく必要がある。

(3) 試験の回数について

本委員会で提案するコンクリート法を、実際に用いられるコンクリート（例えば JIS A 5308 に準拠して生コンプラントで製造されるコンクリート）全てについて行うとすれば莫大な個数の供試体を用意しなければならない。このような場合、使用される骨材の種類が同じで、配合が大きく変わらない範囲であれば、単位セメント量が小さくかつアルカリの添加量の少ないコンクリートにおいて有害な膨張が認められなければ、よりセメント量とアルカリ添加量が多いコンクリートにおいては「反応性あり」と考えることが可能となり、試験すべきコンクリートの種類がおのずから限定されることになる。

また、アルカリ骨材反応を抑制するのに効果的で、抑制対策として推奨されている低アルカリセメントや混和材料の含有率の大きい混合セメント（高炉セメント B、C 種、フライアッシュセメント B、C 種）や高含有率で高炉スラグやフライアッシュなどの混和材料が使用されている場合には、コンクリート法でアルカリシリカ反応性を判定しなくてもよいことになる。

以上述べてきたように、本コンクリート法をより実用的かつ汎用化するためには、今後さらに検討が加えられなければならない事項がかなり残されたままである。

このことについては、本委員会の構成メンバーは、委員会が解散した後においても研究を精力的に継続するとともに、定期的に情報の交換を行い、コンクリート法の条文の追加や改善を図って行く考えである。

本コンクリート法に対するご批判やご意見は、より良い判定試験法を確立するために必要不可欠であるので、JCI事務局にどしどしご意見を寄せられることを希望する次第である。

4. コンクリート法の提案

本委員会の2ヵ年にわたる活動の締め括りとして「コンクリートのアルカリシリカ反応性判定試験方法（案）（コンクリート法）」を提案し、1991年3月に開催されたシンポジウムの席上公表した。ここに、その条文の全部と解説の一部について記しておく。

コンクリートのアルカリシリカ反応性判定試験方法（案）
（コンクリート法（ JCI AAR-3 ））

1. 適用範囲

この試験方法は、コンクリート供試体の長さ変化を測定することにより、任意の配（調）合のコンクリートが、アルカリシリカ反応性を有するか否かを判定する試験に適用する。ここでいう、コンクリートのアルカリシリカ反応性とは、コンクリートにおいて将来アルカリシリカ反応による有害な膨張やひびわれが生じることである。

〈解説〉（一部省略）

コンクリートのアルカリシリカ反応性をより正しく判定するには、実際のコンクリートに用いられる材料と配（調）合に基づいてコンクリート供試体を作製し、判定試験を実施することが望ましい。ここに規定するコンクリート法は、任意の配合のコンクリートのアルカリシリカ反応性を判定するための試験法である。ただし、このコンクリート法は、結果の判定をできるだけ早期に行うため、アルカリの添加と、温度40℃、湿度 100%の反応促進条件を採用した。

2. 試験用器具

2.1 型 枠

供試体作製用型枠は、100mm × 100mm × 400mm または 75mm × 75mm × 400mm の供試体の作製が可能な型枠で、両端に長さ変化用ゲージプラグを埋め込めるようにゲージプラグ固定用の穴をあけたものとする。

2.2 長さ変化測定器具

長さ変化の測定は、JIS A 1129に規定するダイヤルゲージ方法による。ダイヤルゲージは JIS B 7503の0.01mm目盛り（精度）のものを使用する。

2.3 ゲージプラグ

ゲージプラグは、供試体の長軸方向の両端部中央に埋め込む形式で、試験中に腐食しない金属製のものとする。

2.4 供試体被覆材

供試体を被覆する保水性の高い保水紙は、それぞれの供試体の表面が被覆できる大きさを持ち、試験中にアルカリに侵されて品質が低下しない材質のものとする。保水紙で被覆された供試体を包む網袋は、伸縮性を持ち、試験中にアルカリに侵されないものとする。保水紙および網袋で被覆された供試体の水分の蒸発を防止するためのポリエチレン製の袋は、供試体全面を収納し、かつ供試体の重量に耐える厚さを持ち、密閉可能な寸法を有するものとする。

〈解説〉（2.2、2.3に対する解説省略）

2.3 供試体の表面を常に湿潤状態に保つために使用する保水紙は、高吸水性のシート状のもの、ポリプロピレン 100%の不織布が望ましい（一部省略）。

3. 使用材料

3.1 コンクリート

レデーミクストとコンクリートあるいは、試験対象用のコンクリートに使用される材料を用いて練り混ぜたコンクリートを用いる。

3.2 水酸化ナトリウム

水酸化ナトリウムは、JIS K 8576に規定する試薬を使用する。

(3.2に対する解説省略)

4. 供試体の作り方

4.1 コンクリートの配(調)合

配(調)合は、レデーミクストコンクリートあるいは試験対象のコンクリートの配(調)合とする。添加するアルカリは、水酸化ナトリウムとし、その添加量は酸化ナトリウム当量で、各バッチでそれぞれコンクリート 1 m³当たり 2.4kg とする。

4.2 コンクリート供試体の作り方

コンクリートの作り方は試験対象のコンクリートの作り方と同様とするが、原則としては、JIS A 1138および JIS A 1132 による。

供試体の寸法は、100mm × 100mm × 400mm または 75mm × 75mm × 400mm を標準とする。供試体の個数は、同一条件の試験に対してそれぞれ 3 個とする。

4.3 アルカリの添加方法

アルカリの添加方法は、次のうちのいずれかによる。

- (1) 同時添加法：練混ぜ水に水酸化ナトリウムを加えて水酸化ナトリウム水溶液としてアルカリを添加する。
- (2) あと添加法：練り上がったコンクリートに細粒状水酸化ナトリウムを添加して、JIS A 1138によって再び練り混ぜ、アルカリを添加する。

〈解説〉

4.1 通常、アルカリ量が多くなるのに伴ってアルカリシリカ反応による膨張率は大きくなる。しかし、アルカリベシマムの存在する骨材では、ベシマムを超えたアルカリの添加量によって、逆に小さな膨張率となるので、添加アルカリ量と膨張率との間にどのような関係があるかを知るためには、添加アルカリ量を種々変えた配合について検討する必要がある。コンクリート法制定のための共通試験結果によれば、2.40kg/m³ のアルカリを添加すれば、コンクリートのアルカリシリカ反応性の誤判定をすることはほとんどないことが分かった。そこで、反応性骨材を使用したコンクリートにおいては、総アルカリ量が酸化ナトリウム当量で 3～4 kg/m³ を超えたときに有害な膨張の発生が認められていることを考慮し、コンクリート 1 m³中の総アルカリ量がこの限界値を僅かに超えた、添加アルカリ量 2.40kg/m³ の配合のコンクリートが有害な反応を示すか否かによって判定することとした(一部省略)。

(4.2に対する解説省略)

4.3 あと添加法は、生コンクリートへ適用できる方法である。この方法で 75×75×400mm の供試体を作製する場合には、先ず練上がり直後のコンクリートを JIS A 1128 に規定する容器で 7ℓ のコンクリートを計り取り、これを練り板上にあけてから、細粒状の NaOH を 21.7g (コンクリート 1 m³当り Na₂O eq. で 2.40kg/m³ に相当) ふりかけ、スコップで均質となるまで手早く練り混ぜた後、型枠につめる。10×10×40cm の供試体を作製する場合には、同上の容器で 2 回計量すればよい(一部省略)。

5. 基 長

供試体は、コンクリートの打ち込み後20時間以降24時間以内で脱型を行い、直ちに JIS A 1129に従って基長を測定することを原則とする。

〈解説〉（省略）

6. 供試体の貯蔵方法

6.1 供試体の被覆

基長の測定が終った供試体は、水を含ませた保水紙を用いて表面を覆い、これを供試体表面に密着させるために、供試体全体を伸縮性のある網袋で包み、さらに、水分の蒸発を防止するために、ポリエチレン製の袋に収納して密閉する。

6.2 供試体の貯蔵方法

被覆の終った供試体は、温度 40 ± 2 ℃に制御できる貯蔵容器または恒温室に貯蔵する。貯蔵中、供試体は互いに接触しないように、また、ゲージプラグに供試体の重量がかからないように適当な架台を用いる。

〈解説〉

6.1 保水紙は予め水に浸しておいて使用時に軽く絞る（約100gの水が含まれていることが望ましい）（一部省略）。

7. 測定項目及び測定方法

7.1 測定項目

供試体の長さ変化を所定の材令ごとに測定する。その際、供試体の表面を観察して、最初にひびわれやゲルが滲出した材令を記録する。

7.2 測定方法

長さ変化は、 20 ± 3 ℃に制御された室内で、JIS A 1129に従って測定する。

供試体は、測定の24時間前に貯蔵容器または恒温室からとりだして、測定室内に移動し、被覆したまま放冷して、供試体温度を測定室内温度に近づけておく。

7.3 測定材令

長さ変化は、基長測定時のほか、以下の材令で測定する。

1. 2. 3. 4. 5 および6か月

8. 膨張率の算出

ダイヤルゲージの読みをもとに、次の式によって 0.001%まで計算して、それぞれの材令における膨張率を算出する。

$$\text{膨張率 (\%)} = \frac{(X_i - s X_i) - (X_{ini} - s X_{ini})}{L} \times 100$$

ここに、 X_i : 材令 i における供試体のダイヤルゲージの読み

sX_i : 材令 i における標準尺のダイヤルゲージの読み
 X_{ini} : 供試体脱型時のダイヤルゲージの読み
 sX_{ini} : 同時に測定した標準尺のダイヤルゲージの読み
 L : 有効ゲージ長 (ゲージプラグ内側端面の距離)
($X_i, sX_i, X_{ini}, sX_{ini}, L$ の単位は同一とする。)

9. 判定

供試体 3 本の平均膨張率が、6 か月後に 0.100%未満の場合は、対象としたコンクリートは「反応性なし」と判定し、0.100%以上の場合は「反応性あり」と判定する。

〈解説〉

コンクリートのアルカリシリカ反応性の判定に用いる膨張率は、ひびわれが確認できる膨張率であること、試験の精度上信頼性のある膨張率であること、さらには、実コンクリート構造物にアルカリシリカ反応による損傷が確認されているコンクリートを「反応性あり」と判定できること、アルカリ反応性の鉱物を含まず化学法やモルタルバー法で「無害」と判定される骨材を用いたコンクリートを「反応性なし」と判定できること、などを考慮して0.100 %と定めた。

10. 精度

個々の供試体のある材令の膨張率が、その前の材令の膨張率を下回ってはならない。ただし、下回る量が膨張率において 0.010%以下の場合には精度は満たされていると考えてよい。

11. 報 告

報告には、次の項目を記載する。

- (1) 結果判定日
- (2) 実施者
- (3) 細・粗骨材の産地、および岩種
- (4) JCI AAR-1 化学法、JCI AAR-2 モルタルバー法等によるアルカリシリカ反応性試験結果と判定結果
- (5) セメントおよび混和材料の種別とそれぞれのアルカリ量
- (6) コンクリートの配 (調) 合
- (7) 供試体寸法
- (8) アルカリの添加方法 (同時添加法、あと添加法の別)
- (9) 供試体各材令ごとの膨張率とその平均値および判定結果
- (10) 試験中および試験後の供試体観察によって発見された重要な事項等
- (11) 膨張率の経時変化図