

[1111] アルカリ骨材反応に及ぼす試験要因に関する研究

正会員 西林 新蔵 (鳥取大学工学部)  
 正会員 ○矢村 潔 (鳥取大学工学部)  
 鳥飼 一吉 (鴻池組)

1. まえがき

コンクリート構造物に有害な損傷を与えるアルカリ骨材反応は、その機構も複雑で、非常に多くの要因の組合わせによって現われることが多い。このことが、コンクリート用骨材の反応性評価のための汎用的な試験方法の確立を困難にしている大きな原因である。現在、世界的に広く用いられているいわゆる化学法にしても、ある骨材の潜在的なアルカリ反応性の危険性の有無を判定するもので、その骨材を用いたコンクリートについての有害な損傷を生じる可能性を直接判定するものではない。この点でモルタルバー法は、比較的直接的にコンクリートとしての有害性を判定し得る方法として有効であるが、本来この方法はアメリカにおいて、個々の工事に対する骨材の判定用として開発されてきたもので、これをそのまま一般的な骨材判定方法として用いるには多くの問題がある。先に述べたように、モルタルバーの膨張量に影響を与えると考えられる要因はきわめて多岐にわたっており、それらを組み合わせた試験条件を一律に設定することはきわめて困難である。したがって、コンクリート用骨材のアルカリ反応性評価のための汎用的な試験方法を確立していくためには、アルカリ骨材反応に及ぼす試験要因に関する資料の蓄積がきわめて重要、かつ緊急の問題である。本研究ではこのような観点から、モルタルバー法における膨張量に影響を与える各種要因とその程度を実験によって把握し、より合理的な試験条件設定のための基礎的資料を得ることを目的とするものである。

2. 実験概要

2.1 使用材料

本実験で使用した骨材は、コンクリート構造物に使用され損傷の生じたことが報告されている骨材3種類(O, T1, T2)と非反応性骨材(NT)である。それぞれの骨材の岩石名、産地、物理的性質を表-1に示し、また化学法による反応性試験の判定図を図-1に示す。使用セメントは、普通ポルトランドセメントで、アルカリ含有量は、セメント重量比で Na<sub>2</sub>O 当量 0.50, 0.80 および 1.00% のものである。また、過剰添加用のアルカリ化合物として、試薬一級の NaOH, NaCl を使用した。

2.2 実験計画

本実験では、3種類の反応性骨材および1種類の非反応性骨材について、各種試験要因を変化させたモルタルバー法による試験を行い、膨張量等の骨材

表-1 骨材の諸特性

骨材		産地	比重 (%)	吸水率 (%)
記号	岩石名			
O	古銅輝石安山岩	瀬戸内東部産	2.55	1.81
T1	斜方輝石安山岩	鳥取県産	2.60	1.93
T2	斜方輝石安山岩	鳥取県産	2.64	1.48
NT	砂岩	鳥取県産	2.70	0.65

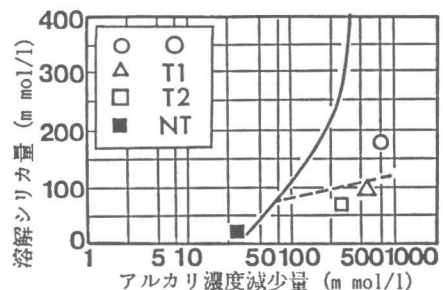


図-1 化学法による判定図

の反応性評価のための指標を測定し、各種要因との関係について検討した。本実験における主たる要因は、供試体寸法、添加アルカリの種類及び量、反応骨材混合割合、配合要因（水セメント比、砂セメント比）、破碎方法、締固め方法および時間である。また反応性評価のための指標として測定した項目は、膨張量および動弾性係数、強度（圧縮、曲げ）である。それぞれの要因における水準を表-2に示す。

表-2 実験計画

要 因		水 準
骨材の種類		T1, T2, O, NT
供試体寸法 (cm)		4×4×16 (JIS), 2.54×2.54×28.5 (ASTM)
添加アルカリの種類及び量 (Na <sub>2</sub> O eq. %)		セメント単味 (0.5, 0.8, 1.0) NaOH (1.0, 1.5, 2.0, 2.5) NaCl (1.5, 2.0)
反応性骨材割合 (%)		20, 40, 60, 80, 100
配合要因	水セメント比	0.45, 0.50, 0.55
	砂セメント比	2.00, 2.25, 2.50
破 碎 方 法		B.S試験破碎方法 ジョークラッシャー破碎方法
締固め時間 (秒)	1 層	0 (樑突きのみ), 30, 60, 120
	2 層	60, 120

### 2.3 実験方法

供試体は所定の要因、水準のもとに練り混ぜ、打設を行い、24時間恒温室（20℃）内に保存し、脱型後初期長さを測定してから38℃±2℃、R.H.100%の養生槽内に保存し、所定期間毎に測定を行った。

アルカリの過剰添加は、アルカリ含有量 Na<sub>2</sub>O 換算 0.5% のセメントを使用し、合計のアルカリ含有量が表-2に示した所定の値となるように練混ぜ水に NaOH あるいは NaCl を加える方法によった。破碎方法における B.S 試験破碎方法とは、B.S 812 1975 規定の破碎値を求めるための装置を使用し、約 40 トンの圧縮荷重で破碎した試料をふるい分け、所定の粒度分布になるように調整したものである。また、締固め方法については、突き棒のみで締固めたものを 0 秒として、その状態から振動台による振動締固めをそれぞれ所定の時間行った。2 層の締固めの場合は、振動時間を各層半分として締固めを行った。

## 3. 実験結果とその考察

### 3.1 反応骨材混合割合およびアルカリ量

材令 3, 6, 9 ヶ月における T2 骨材について、反応骨材混合割合と膨張率との関係を図-2に示す。本実験においては、反応骨材のベシマム混合割合は、アルカリ量が增大すると共に反応骨材混合割合の多い方へ移行する傾向が認められる。すなわち、材令 9 ヶ月におけるベシマム混合割合は、Na<sub>2</sub>O 当量 2.5% で 100%、2.0, 1.5, 1.0% で 40% となっている。またベシマム混合割合は材令にも依存しており材令がたつにしたがって反応骨材混合割合が低い方へ移行する傾向が認められる。これらの現象は、骨材の反応性シリカ量とモルタル中のアルカリ量との相対関係によって生じると考えられ、従来から指摘されているところである [1]。さらに本実験では、セメントのアルカリ量が 0.5% の場合は膨張を示さなかった。

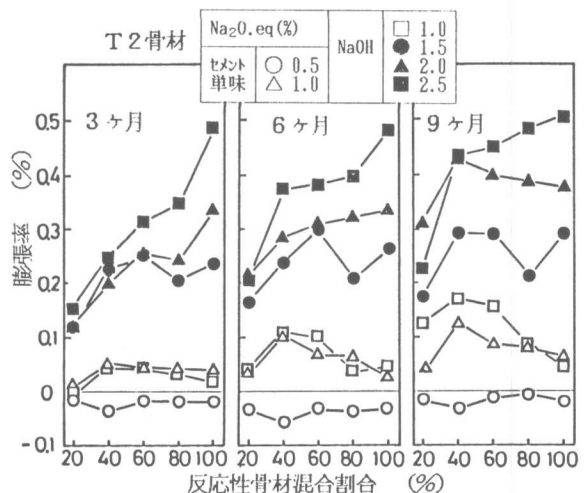


図-2 反応骨材混合割合の影響

### 3. 2 アルカリの種類

図-3に添加アルカリの種類膨張量に及ぼす影響について、同一の条件で添加アルカリをNaOHとNaClに変化させた場合の膨張量の相互関係を示す。図の点線が両アルカリによる差がない状態であり、本実験結果によれば、添加アルカリとしてNaOHを用いたものの方が大きく膨張していることがわかる。また、この傾向は添加アルカリ量が少ないほど顕著である。すなわち、本実験に関する限り、NaOHを添加したものの方が初期における反応が大きく、膨張量も大きいことがうかがえる。しかし、この問題に関しては逆の結果も報告されており、骨材の種類、反応骨材混合割合等によっても影響されるものと考えられる。

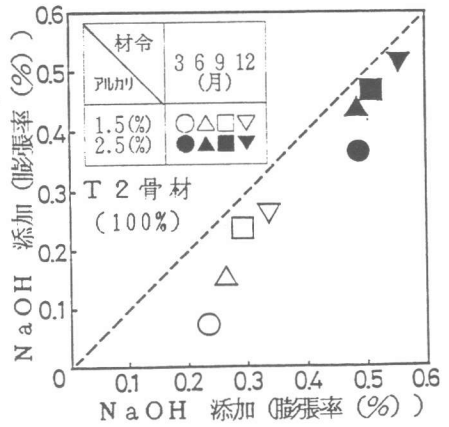


図-3 アルカリの種類による影響

また図-2よりセメント単味でNa<sub>2</sub>O当量1%のもの(△印)とセメントのNa<sub>2</sub>O当量0.5%,添加NaOHのNa<sub>2</sub>O当量0.5%(□印)を比較してみると、材令6ヶ月までは両者ほぼ同じで、材令9ヶ月になると後者の方が若干大きくなっており、比較的長期間膨張が持続していることを示している。

### 3. 3 供試体寸法

図-4にASTM供試体(2.54×2.54×28.5cm)とJIS供試体(4×4×16cm)による膨張量の相関関係を示す。図より、両者による膨張量の差は非常に小さいが、膨張量の大きく発現する領域ではJIS供試体の膨張量の方が若干大きくなる傾向がある。またこの傾向は材令にはほとんど関係しておらず、両者でほぼ同じペースで膨張が発現していると考えて差し支えない。したがって、本実験に関する限り、ASTM供試体、JIS供試体のどちらを用いてもその骨材の反応性評価結果に差はないと考えられる。

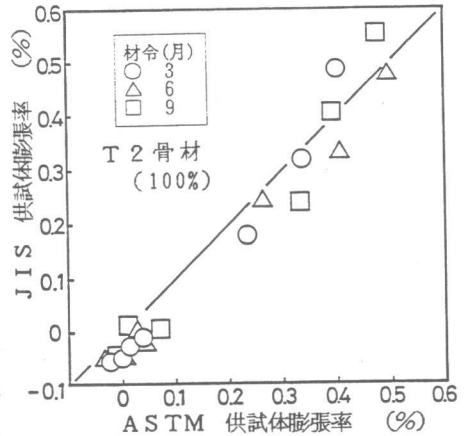


図-4 両供試体寸法の膨張量の関係

### 3. 4 配合要因

反応性骨材を用いたモルタルの水セメント比の材令12ヶ月における膨張量の関係を図-5に示す。図より骨材の種類によって若干の相違はあるが、全般的にみて、Na<sub>2</sub>O当量1.5%までは水セメント比の増加に伴ない膨張量は平衡または減少し、Na<sub>2</sub>O当量2.0%では、水セメント比の増加に伴ない膨張量は平衡または増加する傾向が認められる。水セメント比が増加することによって膨張量が増加する要因としては、強度の低下、拡散係数の低下があげられ、逆に膨張量が減少する要因としては、イオン濃度の低下、空隙量の増加があげられる。これらの要因を実験結果と対比してみると以下のように考えることができる。すなわち、Na<sub>2</sub>O当量が2.0%といった高イオン濃度領域では、水セメント比の増加に伴ないイオン濃度の低下の影響が小さくなり、その結果、強度の低下、拡散係数の低下によって膨張量は平衡または増加する傾向を示し、一方Na<sub>2</sub>O当量1.5%以下では、水セメント比の増加に伴ないイオン濃度の減少の影響

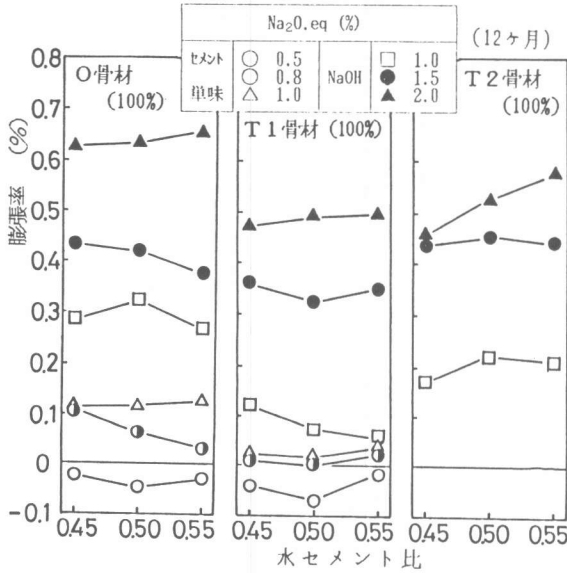


図-5 水セメント比と膨張率の関係

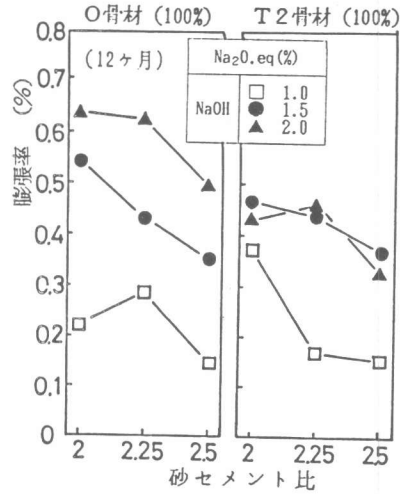


図-6 砂セメント比と膨張率の関係

響が大きくなり、そのため水セメント比の増加により膨張量は小さくなったと考えられる。このことは、反応を開始させ持続させるために必要な細孔溶液中の水酸化アルカリイオンの濃度には限界値があるとするDiamondらの研究結果と共通するものである[2]。

次に、砂セメント比と膨張量との関係を図-6に示す。図より若干の例外はあるものの、全般的にみると砂セメント比の増加に伴い膨張量が減少する傾向にある。これは、本実験では、水セメント比を0.45と一定としているため、砂セメント比の減少に伴いセメント量が増加し、セメント重量に対するNa<sub>2</sub>O当量が一定であっても総アルカリ量が増加することによるためと考えられる。このことはアルカリ骨材反応の防止法としてセメントのアルカリ濃度のみならず総アルカリ量の規制が重要であることを示唆するものである。

### 3.5 破碎方法

B.S試験破碎による骨材を使用した供試体の膨張率とクラッシャー破碎による骨材を使用した供試体の膨張量との関係を図-7に示す。図中の実線は全プロット点の最小2乗法による回帰直線で、これがほぼ原点を通る45°の直線(点線)と一致することから、両破碎方法による差はほとんどないと考えられる。しかし、反応骨材混合割合が60%で膨張量が小さい領域では、クラッシャー破碎骨材の方が大きい膨張を示す傾向が認められる。これは、クラッシャー破碎では急激に破碎を行うため、骨材形状が扁平となりやすく、また骨材表面の凸凹も多くなって材令初期における反応が速くなり膨張量が大きくなることが考えられる。しかし、一般的に有害と判定されるような膨張量の大きい領域では両者は比較的良好に一致しており、破碎

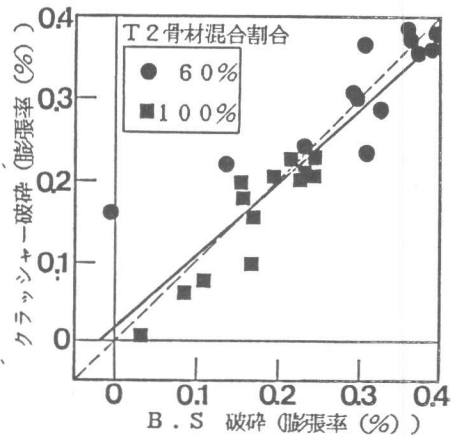


図-7 B.S破碎とクラッシャー破碎の関係

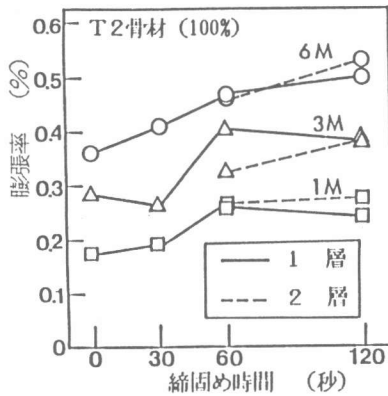


図-8 締固め方法、時間による影響

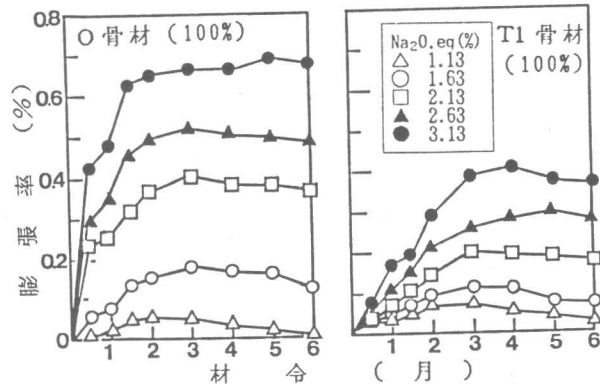


図-9 膨張率の経時変化

方法による差異はないと考えてさしつかえないようである。

### 3.6 締固め方法

締固め方法および時間と膨張量の関係を図-8に示す。図から締固め時間が長いほど膨張は大きくなる傾向が認められる。これは締固め時間が短かいと空隙が多くなり、反応によって生成されるゲルが空隙に流入し膨張圧が緩和されるためと考えられる。一般に、コンクリートの施工における不十分な締固めはコンクリートの性質に重大な悪影響を与えるものであり、絶対に避けなければならない。そこで有効に空隙量を多くするためにAE剤の使用が考えられる。従来の研究でも適量の空気の連行が膨張量を減少させることが報告されており[3]、この方面での実験データの蓄積が期待される。

また、本実験に関する限り、締固め方法の相違、つまり1層で締固める場合と2層に分けて締固める場合の膨張量の差はほとんど現われなかった。

### 3.7 膨張量と強度、動弾性係数との関係

モルタルバー法による反応性評価の指標としては、一般に膨張量が用いられる。しかし、モルタルあるいはコンクリートの劣化の程度を評価する場合には強度、弾性係数等の力学的特性の方がより直接的である。したがって、これらの関係を十分に把握しておくことは、より合理的な骨材の反応性評価試験方法を確立していく上できわめて重要なことである。

反応性骨材(O, T1)の各アルカリ量での膨張量を図-9に示す。またこれと同一の配合、養生条件でのモルタルの曲げ強度と圧縮強度の発現の状態を図-10に

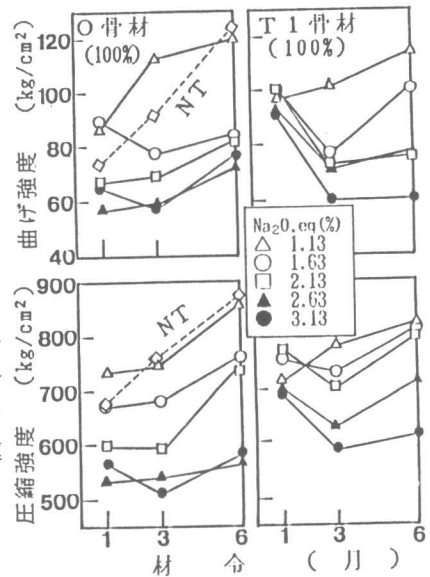


図-10 曲げ、圧縮強度の経時変化

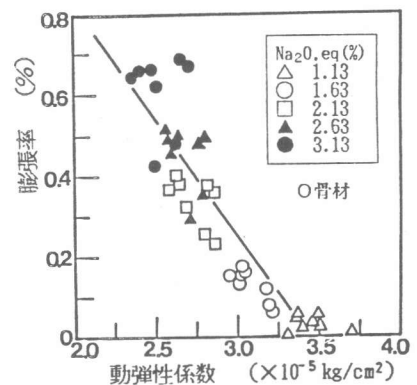


図-11 膨張率と動弾性係数の関係

示す。図から骨材Oは骨材T1に比べ初期において急激な膨張を示し、材令2～3ヶ月で膨張は収束し、一方骨材T1は材令3～4ヶ月で収束している。このことは図-10における強度発現の状況ときわめて密接に対応している。すなわち、材令1ヶ月において骨材Oは強度が相対的に低くばらつきも大きい、これはこの時点で膨張によるひびわれの影響を相当に受けているものと考えられる。一方骨材T1は材令1ヶ月から3ヶ月の間で強度の低下が著しく、この間での急激な膨張に対応している。なおこの傾向は動弾性係数の発現の状況にも認められている。次に膨張量と動弾性係数の関係の一例を図-11に示す。両者の間にはほぼ直線的な関係が認められ、膨張量がモルタルの劣化の程度をかなり正確に表わす指標であることがうかがえる。

#### 4. まとめ

骨材の反応性を評価するためのモルタルバー試験において、各種試験要因の影響を明らかにする目的で行った一連の実験で得られた結果を以下に要約し本論文のまとめとする。

(1) 反応骨材のベシマム混合割合は、アルカリ量が増大すると共に反応骨材割合の多い方に移行する。また、材令がたつにしたがって、反応骨材割合が低い方に移行する。アルカリの種類に関しては、セメント固有のアルカリ、添加アルカリとしてのNaOH、NaClでそれぞれ膨張特性に若干の相違があった。

(2) 本実験に関する限りASTM供試体とJIS供試体とでの膨張特性の相違はほとんど認められなかった。

(3) Na<sub>2</sub>O当量が2%といった高領域では水セメント比の増加につれて膨張量は大きくなり、Na<sub>2</sub>O当量1.5%以下では、逆に膨張量が小さくなる傾向がある。この現象は、モルタルのイオン濃度、空隙量、強度、拡散係数の添加の組み合わせとして発現するものと考えられる。また、砂セメント比が増加すると膨張量が減少する。

(4) B.S破砕試験による骨材破砕とジョークラッシャーによる破砕では、膨張特性にほとんど差がない、また締固め時間を長くすると膨張量が大きくなる傾向がある。

(5) モルタルバー試験による膨張量は、同一配合、養生条件のモルタルの強度、ヤング係数等の力学的特性ときわめて密接な相関関係があり、モルタルおよびコンクリートの劣化を評価する有効な指標である。

最後に本実験を遂行するにあたって多大の協力を賜った鳥取大学工学部土木工学科材料科学研究室の諸氏に感謝の意を表する次第である。また、本研究は文部省科学研究費補助金によって行ったものの一部である。

#### 参 考 文 献

- [1] 日本材料学会：アルカリ骨材反応に関するシンポジウム、1985
- [2] S.Diamond：“Alkali Reaction in Concrete-Pore Solution Effects”，Proc.6th.Int. Conf.Alkali in Concrete, Copenhagen,
- [3] A.D.Jensen：“Studies of Alkali-Silica Reaction-Part II.Effect of Air-Entrainment on Expansion” Cem.Concr.Res.Vol.14, No.13, pp.311～314,1984